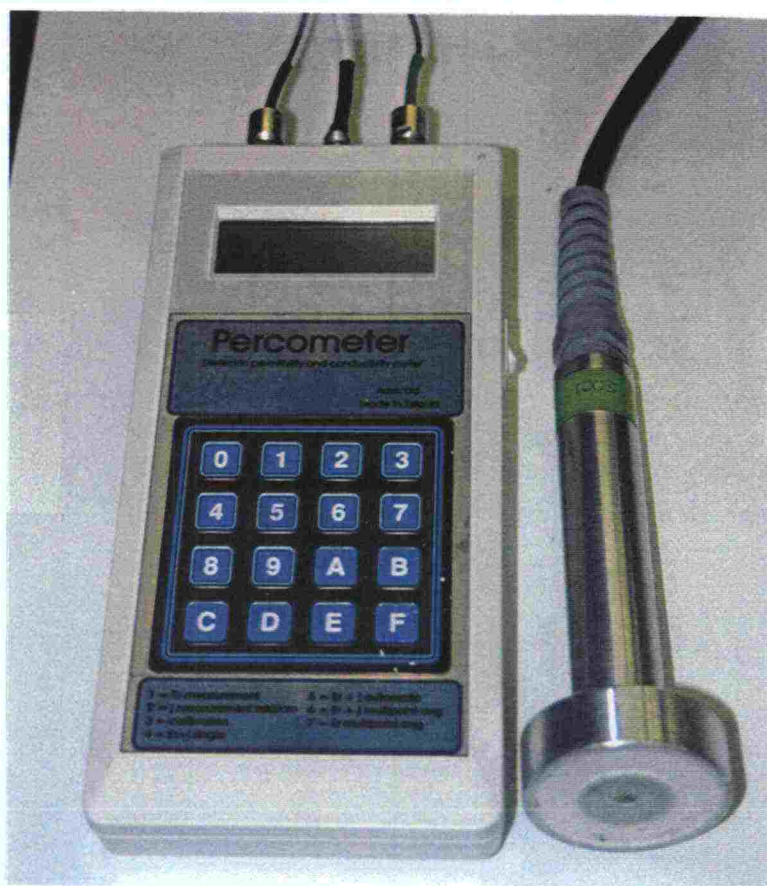
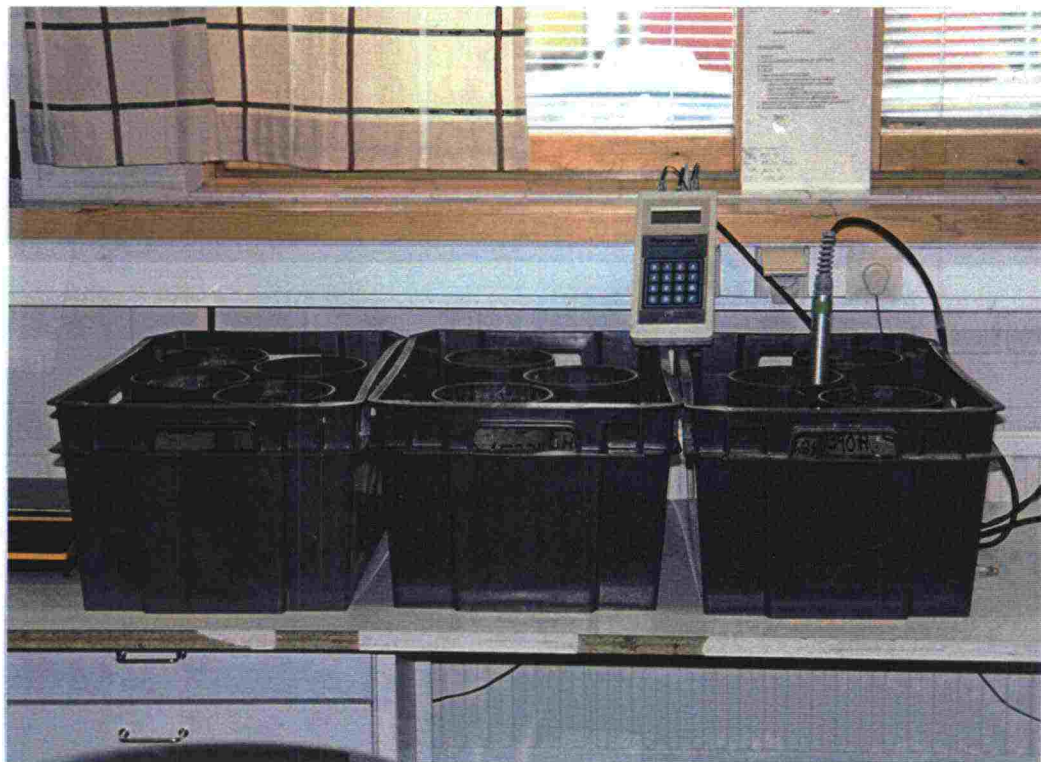


980985



Seppo Ylitapio

## TS-testin käyttö sitomattomien ja sidottujen murskeiden laadunvalvonnassa



Tielaitoksen  
Lapin tiepiirin  
julkaisu

1998

Rovaniemi 1998

08 TIEL / LAP

622.32



9.4.2013 80



**YLITAPIO Seppo: TS-testin käyttö sitomattomien ja sidottujen murskeiden laadunvalvonnassa. Rovaniemi 1998, Tielaitos.**

**Asiasanat** imupaine, dielektrisyys, sähkönjohtavuus, kantava kerros

### **Tiivistelmä**

Tutkimustyön tarkoituksena oli selvittää eri laatuisten ja eri rakeisuuden omaavien murskeiden imupaineominaisuuksia ja siten herkkyyttä vedelle ja heikolle kevätkantavuudelle. Lisäksi selvitettiin bitumilla sidottujen murskeiden imupaine- sekä lujuus- ja pakkaskestävyysominaisuuksia eri bitumipitoisuuksilla. Imupaineominaisuudet kuvaavat materiaalin vedenherkkyyttä ja routivuutta.

Imupaineominaisuuksia selvitettiin Lapin tiepiirissä kehitetyllä Tube Suction Testillä (TS-testi) ja lujuusominaisuuksia halkaisuvetolujuus-mittausten avulla. Pakkasenkestävyysominaisuuksia tutkittiin yhdessä ns. routasyklin ja halkaisuvetolujuus-mittausten avulla.

Tutkimuksen tulokset osoittivat selkeästi TS-testin soveltuvan sitomattomien murskeiden ja tietyin varauksin bitumilla sidottujen murskeiden laadun arviointiin. Sitomattomien murskeiden osalta voitiin selkeästi päätellä, että hienoaineksen määrällä on suuri vaikutus imupaineeseen. Bitumilla sidottujen murskeiden tulokset osoittivat, että ainakin tutkimuksessa käytetty emulgoitu bitumi (BIE300) pystyi tehokkaasti pienentämään dielektrisyyttä ja sitä kautta materiaalin imupainetta verrattuna sitomattomien murskeiden vastaaviin tuloksiin.

## **The use of TS-test to evaluate the quality of the unbound and the bound base materials**

**Keywords** suction, dielectric value, electrical conductivity, base course

### **Abstract**

The primary aim of this study was to evaluate the suction properties of different types base materials with different granularity and sensitivity to water and to the weak spring bearing capacity. Also the suction and the strength features and the durability of freezing were solved to bitumen bounded base materials in different bitumen contents.

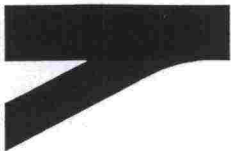
In study the suction properties were solved by Tube Suction Test (TS-test), which has been developed by Finnish National Road Administration, Road District of Lapland and the strength features were solved by split tensile strength.

The results of the study showed clearly, that TS-test procedure is suitable for evaluating the quality of the unbounded base materials and with certain qualifications to the bitumen bounded base materials. The results of the unbounded base materials showed, that grading (fine aggregate) has a great impact to suction. Also the results of the bitumen bounded base materials showed, that bitumen emulsion, which is used in study, can reduce dielectric value and so the suction of material.

**SISÄLTÖ**

<b>TIIVISTELMÄ</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>3</b>
<b>MERKINNÄT</b>	<b>6</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>8</b>
<b>2 TEORIAA</b>	<b>9</b>
2.1 Kantavan kerroksen materiaalit	9
2.1.1 Sitomattomat materiaalit	9
2.1.2 Sidotut materiaalit	10
2.2 Murskeiden sähköiset ominaisuudet	11
2.2.1 Dielektrisyys	12
2.2.2 Sähkönjohtavuus	15
2.2.3 Magneettinen susceptibiliteetti	15
2.3 Materiaalin imupaine	16
2.3.1 Suction teoriaa	16
2.4 Veden olomuodot tierakenteessa	18
2.4.1 Adsorptiovesi	18
2.4.2 Viskoosivesi	19
2.4.3 Vapaa vesi	19
2.4.4 Veden jäätyminen maaperässä	19
<b>3 IMUPAINEKOKKEEN PERUSTEET</b>	<b>21</b>
3.1 Mittausmenetelmät	21
3.2 Dielektrisyyden ja sähkönjohtavuuden mittaus	21
<b>4. LABORATORIOKOKKEET</b>	<b>23</b>
4.1 Laboratoriokokeiden suorittaminen	23
4.1.1 Imupainekoe	23
4.1.2 Halkaisuvelolujuus-koe	25
4.1.3 Routasykli	26
4.2 Laboratoriokokeissa käytetyt murskeet	26





12.08.1998

Tiepiirit

TUTKIMUSRAPORTTI "TS-TESTIN KÄYTTÖ SITOMATTOMIEN JA SIDOTTUJEN KERROSTEN  
LAADUNVALVONNASSA"

Lapin tiepiiri lähettää oheisena Seppo Ylitapion tutkimusraportin TS-testin (tube suction) käytöstä. Lapin tiepiirissä testi on laajassa käytössä erityisesti päällysteiden uusimiskohteissa, joissa on kantavuuspuutteita.

Vastaanottajat voivat kopioida raporttia tarpeensa mukaan. Tarvittaessa tutkimuksesta antaa lisätietoja insinööri Seppo Ylitapio, puhelin 020 444 3665.

Tiejohtaja

  
Tapani Pöyry

Insinööri  
Teettäminen

  
Kalevi Luiro

LIITTEET

Raportti "TS-testin käyttö sitomattomien ja sidottujen kerrosten laadunvalvonnassa"

JAKELU

Tiehallinto, keskushallinnon yksiköt

Tiepiirit, tienpidon teettäminen

Tuotanto

- päällystysyksikkö
- konsultointi
- vienti

Tiepiirien kirjastot

2 kpl

Tielaitoksen kirjasto

VTT/YKI/väylät ja ympäristö

TKK/tielaboratorio

TTKK/rakennusgeologian laboratorio

OY/tie- ja liikennetekniikan laboratorio

Asfalttiliitto ry

Neste Oy/bitumi

Neste Oy/bitumitutkimus

Roadscanners Oy/Timo Saarenketo

Konsultointi/Rovaniemen yksikkö

Seppo Ylitapio

Timo Kenttälä

Kalevi Luiro

---

5. TUTKIMUSTULOKSET JA TUTKIMUSTULOSTEN KÄSITTELY	29
5.1 Tulosten esittäminen	29
5.2 Sitomattomat murskenäytteet	30
5.3 Bitumilla sidotut murskenäytteet	33
6. JOHTOPÄÄTÖKSET	35
7. KIRJALLISUUSLUETTELO	38
LIITELUETTELO	41

## MERKINNÄT

J	on	sähkövirtatiheys
s		sähkönjohtavuus
E		sähkökenttä
c		valon nopeus tyhjiössä (0.3 m/ns)
e		aallon etenemisnopeuteen vaikuttava suure
v		aallon etenemisnopeus
t		kulkuaika väliaineessa
A		vaimeneminen väliaineessa
K		heijastuminen
f		taajuus
R		läpäisykerroin
l		aallonpituus
S		rajapinnan syvyys
$\epsilon_r$		suhteellinen dielektrisyysvakio
$\epsilon$		aineen dielektrisyysvakio
$\epsilon_0$		tyhjän dielektrisyysvakio
F		kahden varauksen välillä vaikuttava voima
r		varausten välinen etäisyys
Q		sähkövaraus
C		kapasitanssi
k		magneettinen susceptibiliteetti
e		huokosluku
s		halkaisuvetolujuus [kPa]
$P_m$		murtovoima [N]
D		näytteen keskimääräinen halkaisija [mm]
h		näytteen korkeus [mm]
E		halkaisuvetojäykkyys [MPa]
e		muodonmuutos maksimivoiman kohdalla [mm]



Tutkimuksessa käytetyt näytemerkinnät:

*Sitomattomat murskenäytteet:*

Näytemerkinnän ensimmäinen numero tarkoittaa kyseisen näytteen järjestysnumeroa (kts. 5.2) ja toinen numerosarja materiaalin #0.074 mm läpäisyprosenttia. Esimerkiksi merkintä 2\_5,1 tarkoittaa Saattoporin mursketta, jonka #0.074 mm läpäisyprosentti on 5,10.

*Bitumilla sidotut murskenäytteet:*

Näytemerkinnän ensimmäinen numero tarkoittaa kyseisen näytteen järjestysnumeroa (kts. 5.2), kuten sitomattomien murskeiden osallakin, jonka jälkeen tulee kirjain (a,b tai c). Kirjaimet tarkoittavat seuraavia koejärjestelyitä halkaisuvetolujuuskokeiden (HVL) yhteydessä:

- a) ainoastaan HVL
- b) TS-testi + HVL
- c) TS-testi + routasykli + HVL

Näytemerkinnän loppuosan numerosarja tarkoittaa näytteen tavoite jäännösbitumipitoisuutta (2.8, 3.4, 4.0). Esimerkiksi merkintä 1b3.4 tarkoittaa Hietavaaran murskenäytettä, jolle on tehty TS-testi ja halkaisuvetolujuuskoe, ja jonka jäännösbitumipitoisuus on 3.4 %.

## 1 JOHDANTO

Maaperän sähköisillä ominaisuuksilla on todettu aikaisempien tutkimuksien mukaan olevan yhteys tiemateriaalien ja pohjamaan mekaanisiin ominaisuuksiin. Maaperän sähköisillä ominaisuuksilla tässä yhteydessä tarkoitetaan dielektrisyyttä ja sähkönjohtavuutta. (Saarenketo 1995)

Dielektrisiä ominaisuuksia on tutkittu Suomessa ja Yhdysvalloissa lähinnä pohjamaista, mutta kattavampaa tietoa kantavan kerroksen etenkin sidotuista materiaaleista ei ole toistaiseksi saatavilla, joten tutkimusprojektin käynnistämiseen oli hyvät edellytykset.

Tutkimuksessa käytetyllä TS-testillä (Tube Suction Test) saadaan dielektrisyysmittausten (pintasondi) avulla selville materiaalin kyky imeä vettä huokostilaansa ja sitä kautta tietoa materiaalin vedenherkkyydestä, eli kuinka paljon materiaali imee vettä, jos sitä on saatavilla.

Tutkimukseen valittiin kahdeksan eri mursketta (Vaasan tiepiiri 2kpl ja Lapin tiepiiri 6kpl), jotka edustivat käytössä huonoiksi ja hyviksi osoittautuneita murskeita.

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää eri tyyppisten ja eri rakeisuuden omaavien sitomattomien murskeiden imupaineominaisuuksia ja vedenherkkyyttä. Lisäksi selvitettiin bitumiemulsiolla sidottujen murskeiden imupaine- sekä lujuus- ja pakkasenkestävyysominaisuuksia eri bitumipitoisuuksilla. Yhtenä tutkimuksen tavoitteena oli löytää se minimibitumipitoisuus, jolla rakenne toimisi vielä sidotun rakenteen tavoin.

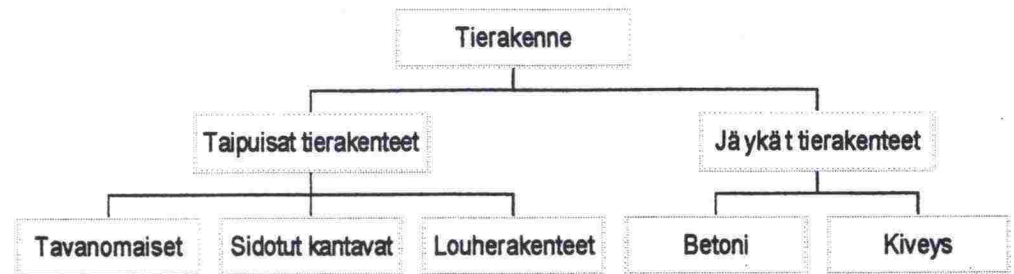
Dielektrisyydellä on sinänsä jo merkitystä mm. maatutkamittausten tulosten tulkinnassa, missä ko. ominaisuutta käytetään määritettäessä rakenteiden kerrospaksuuksia. Samoin dielektrisyyttä voidaan hyödyntää eri materiaalien routivuusluokittelussa.

Tutkimuksen aikana kerättiin kokemuksia myös virolaisen Adek Ltd:n valmistamasta uudesta dielektrisyys- ja sähkönjohtavuus mittarista (Percometer), joka korvasi aikaisemmin käytössä olleen analogisen mittarin.

## 2 TEORIAA

### 2.1 Kantavan kerroksen materiaalit

Tierakenne voidaan jakaa lujuusopillisen luokittelun perusteella taipuisiin ja jäykkiin tierakenteisiin. Taipuisat tierakenteet jaetaan edelleen tavanomaisiin tierakenteisiin, sidottuihin kantaviin tierakenteisiin ja louherakenteisiin. Vastaavasti jäykät tierakenteet jaetaan betoni- ja kiveystierakenteisiin. Betonisista tierakenteista ovat esimerkiksi betonitie ja sidottuna kantavana rakenteena maabetoni. (Stabilointikurssi 20-21.2.1992)



Kuva 1. Tierakenteen lujuusopillinen luokittelu (Stabilointikurssi 20-21.2.1992)

Yleensä kantavan kerroksen materiaalit jaetaan vain kahteen eri luokkaan, sitomattomat ja sidotut. Hyvälaatuisten soramurskeiden vähetessä materiaaleina käytetään yhä suuremmissa määrin kalliomursketta. Toisaalta teollisuuden sivukivituotteiden, esimerkiksi masuunikuonan, käyttö etenkin tierakentamisessa on lisääntynyt huomattavasti.

#### 2.1.1 Sitomattomat materiaalit

Sitomattomien materiaalien käyttö kantavassa kerroksessa on normaalissa tierakentamisessa yleisempää kuin sidottujen materiaalien, mikä johtuu suurelta osin rakentamiskustannuksien erosta. Tulevaisuudessa sitomattomien materiaalien käyttö tulee väistämättä vähentymään luonnon kiviainesarvojen vähentyessä ja kuljetusmatkojen pidentyessä.

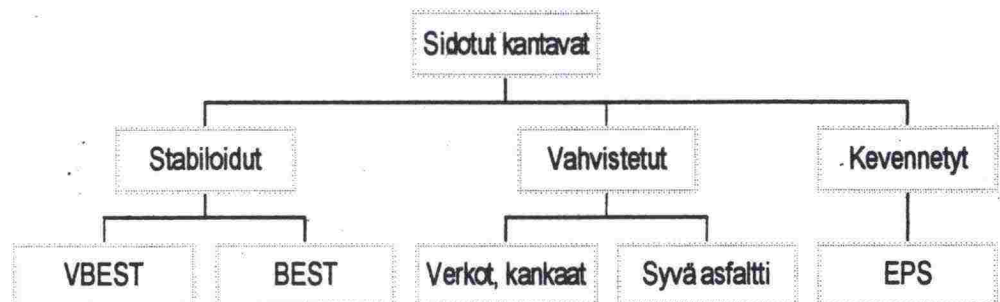
Sitomattoman kerroksen etuna voidaan pitää suhteellisen halpoja rakentamiskustannuksia ja toisaalta haittapuolena rakenteen lyhyempää kestoikää verrattuna sidottuun kerrokseen.



### 2.1.2 Sidotut materiaalit

Sidottujen materiaalien käyttö kantavassa kerroksessa on rajoittunut lähinnä korjausrakentamiseen ja vilkkaasti liikennöityjen väylien kulutuskerroksen alustaksi. Kehittyneiden stabilointimenetelmien ansiosta sidottujen materiaalien käyttö tulevaisuudessa lisääntyy huomattavasti.

Taipuisat sidotut kantavat tierakenteet voidaan jakaa stabiloituihin, vahvistettuihin ja kevennettyihin tierakenteisiin. Stabiloidut tierakenteet jaetaan vaahtobitumiemulsiostabiloituihin (VBEST) ja normaaleihin bitumiemulsiostabiloituihin (BEST) rakenteisiin, jotka kummatkin voivat olla joko asemasekoitteisia tai paikallasekoitettuja. Vahvistetut tierakenteet sisältävät geovahvistetut rakenteet (verkot, kankaat) ja syväasfalttirakenteet. (Stabilointikurssi 20-21.2.1992)



Kuva 2. Sidottujen kantavien tierakenteiden jako (Stabilointikurssi 20-21.2.1992)

Uudisrakentamisessa stabilointia käytetään myös silloin, kun tarvittavasta kiviaineksesta on puutetta tai kuljetusmatkat ovat pitkiä. Myös vilkasliikenteisillä paljon raskasta liikennettä välittävillä väylillä hyödynnetään yhä enemmän stabiloinnin tuomia etuuksia.

Korjausrakentamisen yhteydessä stabiloinnilla pyritään parantamaan etupäässä kantavuutta ja tasaamaan kantavuusvaihteluja. Roudan tielle aiheuttamat vauriot korjataan erikseen ennen mahdollista stabilointia.

Huolellisesti tehdyillä ennakkotutkimuksilla ja -suunnittelulla voidaan stabi-loitu kerros mitoittaa vastaamaan tulevia kuormituksia ja siten hyödyntää kaikki stabiloinnin tuomat edut.

## 2.2 Murskeiden sähköiset ominaisuudet

Murskeiden tärkeimpiä sähkömagneettisia ominaisuuksia ovat sähkönjohtavuus, dielektrisyys ja magneettinen susceptibiliteetti.

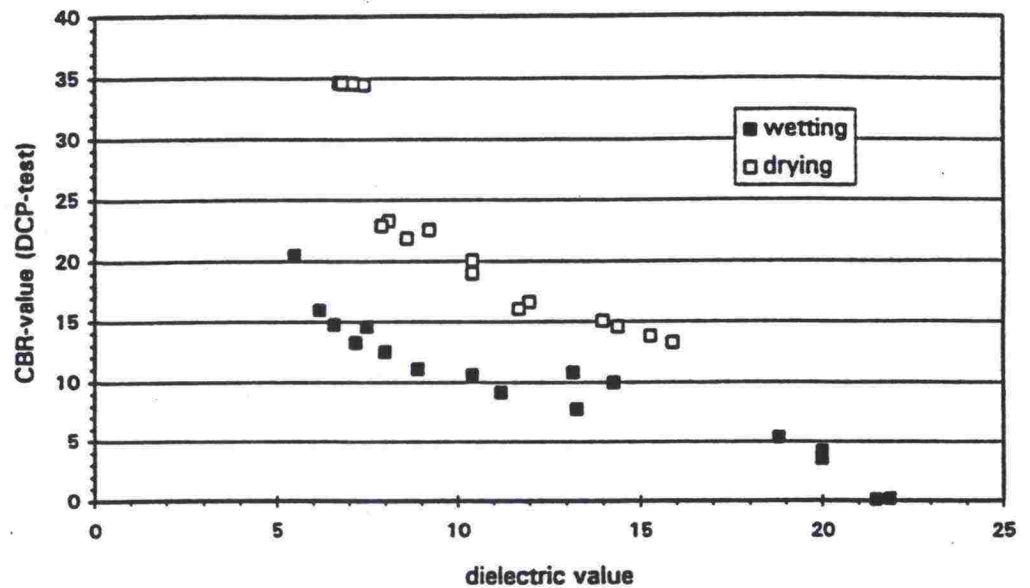
Sähkönjohtavuus  $[s]$  ilmaisee varausten kykyä liikkua väliaineessa sähkökentän  $[E]$  vaikutuksesta. Liikkuvat sähkövaraukset muodostavat väliaineessa sähkövirran  $[I]$ , jonka suuruus pinta-ala yksikköä kohden on sähkövirtaheys  $[J]$ . Perussuureiden keskinäinen yhteys ilmaistaan usein Ohmin lain mukaan  $J = s \times E$ .

Dielektrisyys  $[\epsilon]$  kuvaa aineen kykyä varautua ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta. Dielektrisyysominaisuudet eli aineen sidotuista varauksista aiheutuvat sähköiset polarisaatio-ominaisuudet tulevat merkitsevimmiksi silloin, kun aineen sähkönjohtavuus on pienempi kuin  $10^3 \text{ S/m}$ . Varsinkin sähkönjohtavuus, mutta myös dielektrisyys ovat taajuusriippuvaisia siten, että taajuuden kasvaessa dielektrisyys pienenee ja vastaavasti sähkönjohtavuus kasvaa (Peltoniemi 1988, Olsson 1987).

Magneettinen susceptibiliteetti  $[k]$  kuvaa aineen magnetoitumiskykyä. Tärkeimpiä kivilajien magneettiseen susceptibiliteettiin vaikuttavia tekijöitä ovat kiviaineen magneettipitoisuus, raekoko ja jossakin määrin lämpötila (Peltoniemi 1988).

Yleisesti voidaan todeta, että sähkömagneettisen aallon etenemisnopeuteen  $[v]$  ja heijastumiseen  $[K]$  vaikuttavat väliaineen dielektrisyys ja susceptibiliteetti. Väliaineen sähkönjohtavuus vaikuttaa aallon vaimenemiseen ja sillä on vain vähäinen vaikutus heijastumiseen. Kun dielektrisyiden ja susceptibiliteetin yhteisvaikutusta kuvataan suurella  $[e]$ , voidaan käytännön mittauksissa käyttää yksinkertaisia kaavoja. (Maatutkaluotaus 1991)

Vedellä kyllästämättömän väliaineen sähköisiin ominaisuuksiin voivat vaikuttaa kyllästysasteen lisäksi kyllästysvaiheet, jotka ovat peräisin toistuneista kastumisista ja kuivumisista. Tällä ns. kyllästyshistorialla (hysteresis-ilmiö) voi olla huomattava merkitys määritettäessä seosten sähköisiä ominaisuuksia ja kyllästyshistoria tulisi taten ottaa huomioon tarkasteltaessa veden kyllästämättömästä seoksesta saatuja mittaustuloksia. Eri kyllästysvaiheiden aiheuttamat muutokset näkyvät siten, että kyllästyksen aikana mitatut dielektrisyydet ja sähkönjohtavuudet ovat paljon suurempia kuin kuivumisen aikana mitatut arvot. Tämä ilmiö selittyy huokostilassa olevaan veden ja ilman jakauman muutoksilla (Knight ja Knoll 1990, Majjala 1991 mukaan).



Kuva 3. Hysteresis-ilmiön vaikutus dielektrisyteen ja materiaalin lujuuteen

Muita sähköisiä ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat väliaineen rakenne, rakenneosien koko, rajapintojen sähkökemiallinen luonne, huokoisuus, vesipitoisuus, veden jakautuminen, ionikonsentraatio, ominaispinta-ala, lämpötila, paine ja tiheys (Schön 1983).

### 2.2.1 Dielektrisyys

Suhteellinen dielektrisyysvakio [ $\epsilon_r$ ] on aineen dielektrisyysvakion ja tyhjiön dielektrisyysvakion suhde.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

jossa

$\epsilon_r$  on aineen suhteellinen dielektrisyysvakio

$\epsilon$  on aineen dielektrisyysvakio

$\epsilon_0$  on tyhjiön dielektrisyysvakio



ja kompleksisessa muodossa esitettynä

$$\epsilon_r = \epsilon' - j \times \epsilon''$$

jossa  $\epsilon'$  on suhteellisen dielektrisyysvakion reaaliosa  
 $\epsilon''$  on suhteellisen dielektrisyysvakion imaginaariosa  
 $j = (-1)^{0,5}$

(Olsson 1987)

Yleistäen voidaan todeta, että tiemateriaaleissa reaaliosa kuvaa materiaalissa olevien polaaristen komponenttien, lähinnä vesimolekyylien, kykyä seurata eri taajuisia vaihtovirtakenttää. Korkean dielektrisyysarvon omaavat materiaalien polaariset komponentit seuraavat vaihtovirtapulssin polariteettia ja tällöin aallonkulku kyseisessä väliaineessa hidastuu. Dielektrisyysarvon ääriarvoina pidetään toisaalta tyhjiötä (ilmaa), jonka dielektrisyysarvo on 1 ja aallon kulkunopeus 33 cm/ns ja toisaalta pelkästään polaarisia vesimolekyyliä sisältävää tislattua vettä, jonka dielektrisyysarvo on 81 ja aallon kulkunopeus 3,7 cm/ns. Dielektrisyysarvon imaginaariosa kuvaa taas materiaalissa tapahtuvia sähköisiä häviöitä. (Saarenketo 1996)

Uunikuivan pohjamaan ja murskeiden mineraaliaineksen dielektrisyysarvo vaihtelee välillä 4,5-6,5. Tiemateriaalien ja pohjamaan dielektrisyysarvoa kontrolloi siis materiaalin huokoisuus ja vedenkyllästysaste. Kuitenkin myös materiaalin hienoainepartikkeleiden pinnalle adsorboituneiden vesimolekyylien määrä vaikuttaa dielektrisyysarvoon siten, että tiukimmin sitoutuneilla adsorptioveden dielektrisyys lähestyy jään dielektrisyysarvoa 3,6-4,0. (Saarenketo 1996)

Jäässä vesimolekyylit ovat järjestäytyneet heksagoniseksi kidejärjestelmäksi eivätkä ne kykene seuraamaan vaihtovirtakenttää. Dielektrisyysarvo voidaan määrittää kokeellisesti tai voidaan käyttää kirjallisuudessa esiintyviä, kokemuseräisiä kaavoja. (Saarenketo 1995)

Materiaali	Suhteellinen dielektrisyys	Sähkönjohtavuus
Ilma	1	0
Vesi	81	$10^{-4} - 3 \times 10^{-2}$
Jää	3,1 - 4,3	$10^{-3}$
Lumi	1,4	$10^{-6} - 10^{-5}$
Ikirouta	4,0 - 8,0	$10^{-5} - 10^{-2}$
Kuiva betoni	6,0	$1,2 \times 10^{-3}$
Kasteltu betoni	10,9	$7,1 \times 10^{-3}$
Asfaltti	$2,0 - 61,25 \times 10^{-3}$	
Savi (veden kyllästämä)	8,0 - 12,0	$10^{-1} - 1$
Siltti (veden kyllästämä)	10,0	$10^{-3} - 10^{-2}$
Hiekka (veden kyllästämä)	30,0	$10^{-4} - 10^{-2}$
Hiekka (kuiva)	4,0 - 6,0	$10^{-7} - 10^{-3}$
Turve	55,0 - 75,0	

Taulukko 1. Eri materiaalien dielektrisyyden ja sähkönjohtavuuden arvoja (Marjeta 1993)

## 2.2.2 Sähkönjohtavuus

Luonnossa tavataan neljää erilaista johdetyyppiä (eristeet, puolijohteet, metalliset johteet ja kiteiset liuokset), joiden erilaiset sähkönjohtokyvyt johtuvat niiden atomirakenteista, etupäässä elektronikuoren rakenteista.

Sähkönjohtavuus riippuu suurimmaksi osaksi maa-aineksen vesipitoisuudesta ja veteen liuenneiden suolojen määrästä. Sähköisten suolaionien määrä taas riippuu maalajin savipitoisuudesta, pH-luvusta, syntytavasta, rakenteesta ja tiheydestä. Lisäksi sähkönjohtavuuteen vaikuttavat suolojen sekä saven laatu (Doolittle 1988, Kerkelän 1990 mukaan).

## 2.2.3 Magneettinen susceptibiliteetti

Paikallisia geomagneettisen kentän vaihteluita aiheuttaa pääosin maankuoren petrofysikaalinen (kivilajifysikaalinen) ominaisuus susceptibiliteetti. Aine voi magnetoitua elektronien liikkeestä ytimen ympäri aiheutuvista magneettivirroista, elektronin pyörimisliikkeen oman akselinsa ympäri aiheuttamasta spinmomentista tai atomiytimen spinmomentista. Mainituista kaksi ensimmäistä määräävät pääosin aineen magneettiset ominaisuudet.

Aineet voidaan jakaa magneettisten ominaisuuksiensa mukaan kolmeen ryhmään. Diamagneettisia ovat aineet, joiden atomeilla ei ole pysyvä magneettinen momentti. Paramagneettisia ovat aineet, joiden atomeilla on pysyvä magneettinen momentti. Teknisesti tärkeimmät materiaalit ovat ferromagneettisia (ferromagneettisia aineosia ei yleensä esiinny käytetyissä maa-aines materiaaleissa). Niissä ei kenttävoimakkuuden ja vuontiheyden välille ole vielä yksikäsitteistä riippuvuutta. Ferromagneettisia ominaisuuksia kuvataan usein ns. hysteresis-käyrien avulla (aikaisemmista vaiheista kertovien).

Magneettinen susceptibiliteetti  $[k]$  on useimmilla väliaineilla niin pieni, pois lukien ferromagneettiset aineet, että tarkasteltaessa aaltokentän käyttäytymistä voidaan laskukaavoissa esiintyneenä yhteisvaikutussymbolina  $[e]$  käyttää suhteellisen dielektrisyyden arvoa. (Marjeta 1993 mukaan)



## 2.3 Materiaalin imupaine

Maarakennuksessa sanalla suction (imupaine) ymmärretään termodynaamisista mittayksikköä, Gibbsin vapaata energiaa, joka on negatiivinen veden kyllästämättömissä materiaaleissa, ja aiheuttaa vetojännitystä eli imupainetta maapartikkeleiden välisessä huokosvedessä. (Saarenketo 1996)

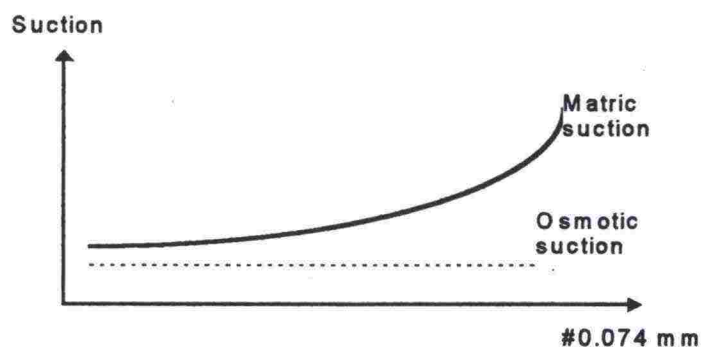
Käytännössä materiaalin imupaineominaisuuksilla tarkoitetaan lähinnä materiaalin kykyä imeä vettä huokostilaansa eli negatiivista huokosvedenpainetta.

### 2.3.1 Suction teoriaa

Vesi vaikuttaa enemmän tai vähemmän kaikkien tiemateriaalien ja pohjamaalajien mekaanisiin voimiin. Kosteuden merkitys riippuu lähinnä materiaaliominaisuuksista, kosteuspitoisuudesta ja jopa hysteresis-ilmiöstä.

Maalajien leikkauslujuuteen ja tilavuusmuutoksiin vaikuttaa maassa vallitseva negatiivinen tai positiivinen huokosvedenpaine. Negatiivisen huokosvedenpaineen vaikuttaessa voidaan käyttää sanaa suction kuvaamaan maapartikkeleiden välistä imupainetta.

Kokonaissuction koostuu pääasiassa kahdesta komponentista, matric suctionista ja osmoottisesta suctionista. Matric suction liittyy lähinnä materiaalin pintaominaisuuksiin, kuten ominaispinta-alaan ja hienoaineksen määrään. Osmoottinen suction liittyy puolestaan huokosveden kemiallisiin ominaisuuksiin (suolan määrä ja CEC).



Kuva 4. Kokonaissuctionin koostuminen

Alhaisissa vesipitoisuuksissa suction kasvattaa materiaalin lujuutta, mutta kosteuden kasvaessa suction vähenee ja korkeissa kosteuspitoisuuksissa syntyvä positiivinen huokosvedenpaine voi alentaa merkittävästi materiaalin vastustuskykyä palautumattomia muodonmuutoksia vastaan. (Saarenketo 1996)

Lisäksi jäätymis-sulamisprosessilla voi olla dramaattinen vaikutus kantavan kerroksen palautuviin ja palautumattomiin muodonmuutosominaisuuksiin. Samoin raekokojakauma, huokoskokojakauma ja ominaispinta-ala vaikuttavat routivuuden lisäksi myös materiaalin veden herkkyyteen. (Saarenketo 1996)

Dielektrisyys vaikuttaa rakeiden pintapotentialiin ja rakeen pinnalla olevan sähköisen kaksoiskerroksen (adsorptiokerroksen) paksuuteen. Rakeiden välisiin repulsio- eli poistovoimiin vaikuttavat muutokset rakeiden välisen liuoksen elektrolyyttipitoisuudessa, kationien valenssissa, dielektrisyysarvossa ja pH:ssa, kun taas vetovoimiin vaikuttavat liuoksen dielektrisyysarvo ja lämpötila. (Saarenketo 1996)

Maassa ja tierakenteessa olevat mineraalipartikkelit ovat yleensä varautuneet siten, että mineraalipartikkeleiden suorat sivut ovat negatiivisesti varautuneita, kun taas terävät särmät ovat positiivisesti varautuneita. (Saarenketo 1996)

Kahden varautuneen etäisyydellä  $d$  toisistaan olevan mineraalipartikkelin pintavarausten  $Q$  ja  $Q'$  välistä vetovoimaa  $F$  voidaan kuvata klassisen Coulombin lain mukaan:

$$F = \frac{Q \times Q'}{K \times d^2}$$

missä  $K$  on varausten välisen nesteen dielektrisyysarvo ja  $d$  varausten välinen etäisyys. (Saarenketo 1996)

Toisin sanoen kantavassa kerroksessa vakioämpötilassa maarakeiden välinen vetovoima dynaamisen kuormituksen aikana, kerroksen taipuessa ja rakeiden välisen etäisyyden  $d$  muuttuessa, riippuu rakeiden välisen vesikerroksen dielektrisydestä. Materiaalin kokonaisvetovoima on suurempi, kun partikkelit ovat lähellä toisiaan ja niiden välissä on vain alhaisen dielektrisyysarvon omaava adsorptiovesikerros ja vetovoima  $F$  pienenee nopeasti, kun korkean dielektrisyysarvon omaavia vapaita polaarisia vesimolekyylejä alkaa esiintyä partikkeleiden välissä. (Saarenketo 1996)

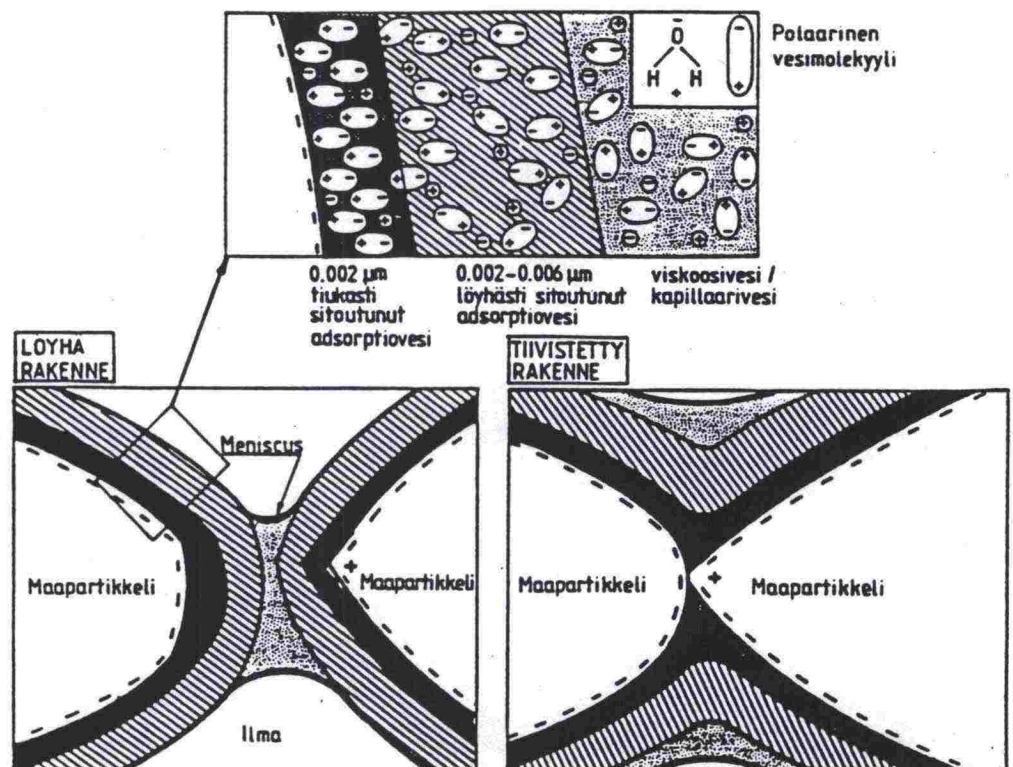


## 2.4 Veden olomuodot maaperässä

Jos unohdetaan mineraalien kiderakenteisiin sitoutunut vesi, karkean luokituksen mukaan vesi voi esiintyä maaperässä, joko ns. vapaana tai sitoutuneena vetenä. Sitoutunut vesi jakaantuu adsorptioveteen eli hygroskooppiin veteen sekä viskoosiveteen, jota on nimitetty myös kapillaarivedeksi. Tosin kirjallisuudessa esiintyy sitoutunut vesi on määritelty usealla eri tavalla. Vapaata vettä voidaan kutsua myös gravitaatiovedeksi, eli maahiukkaset eivät kykene pitämään vettä vaan se painuu painovoiman ansiosta alaspäin pohjavesikerrokseen saakka. Seuraava adsorptioveden, viskoosiveden ja vapaan veden kuvaus perustuu Saarenkedon (1995) kuvaukseen.

### 2.4.1 Adsorptiovesi

Adsorptiovedeksi määritetään tässä sitä vesikerrosta, jonka maa-aines kykenee ilmasta adsorboimaan rakeidensa pinnalle. Mineraalipinnat ovat hydrolyysireaktion (kemiallinen rapautumiseen liittyvä reaktio) vuoksi pääosin negatiivisesti varautuneita ja ainoastaan mineraalien kulmat ja kidekiteellisten akselien toiset päät ovat positiivisesti varautuneita. Polaariset vesimolekyylit järjestyvät mineraalipintaan positiivisesti varautunut osa raepintaa vasten. Adsorptiovedessä lähinnä raetta oleva kerros on voimakkaimmin rakeisiin sitoutunut ja sitoutumisen voimakkuus vähenee etäisyyden kasvaessa rakeen pintaan eli adsorptiovesi voidaan jakaa tiukasti ja löyhemmin sitoutuneeseen kerrokseen. (Saarenketo 1995 mukaan)



Kuva 5. Adsorptiovesikerroksen rakenne maarakeen ympärillä löyhässä ja tiiviissä rakenteessa (Saarenketo 1995)

#### 2.4.2 Viskoosivesi

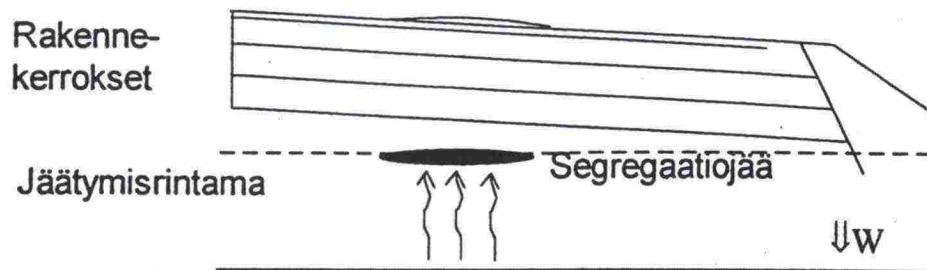
Viskoosivesi eli kapillaarivesi on adsorptioveteen verrattuna löyhemmin maahuokosiin sitoutunutta vettä ja tämän veden määrä ja ominaisuudet vaihtuvat riippuen onko maaperä kostumassa vai kuivumassa, ilmiötä kutsutaan nimellä hysteresis. Kapillaarivesi jakaantuu sähköisiltä ja mekaanisilta ominaisuuksiltaan kahteen kerrokseen, joita voidaan nimittää sisemmäksi ja ulommaksi kapillaarikerrokseksi. Viskoosiveden ja huokosissa esiintyvän ilman rajapinnalla on myös ohut hyvin järjestäytyneiden vesimolekyylien kerros, jota kutsutaan nimellä meniscus tai contractile skin. (Saarenketo 1995 mukaan)

#### 2.4.3 Vapaa vesi

Vapaa vesi eli gravitaatiovesi on sitoutumatonta vettä, joka liikkuu maakerroksien läpi painovoiman ansiosta aina pohjaveden tasoon asti. Vapaan veden määrä maakerroksissa on huomattavasti suurempi kuin adsorptioveden ja viskoosiveden vastaavat määrät.

#### 2.4.4 Veden jäätyminen maaperässä

Kun maaperä jäätyy, ensimmäisenä jäätyy maaperän vapaa vesi ja heikosti sitoutunut viskoosivesikerros alkaen muodostaa heksagonisia jääkiteitä (Tsytovic 1986) ja laajentaen näin tilavuuttaan. Tämä huokosveden jäätyminen ja jääkiteiden kasvu molekyyliltä molekyyliltä pyrkii jatkumaan vaakasuorassa tasossa muodostaen jäälinssiä (Anderson 1989).



Kuva 6. Segregaatiojään muodostuminen



Samalla syntyy energiatilojen ero jäätymisrintaman ja sulan maan välille, mikä taas pyrkii tasapainottumaan sillä, että lisää vesimolekyylejä imeytyy jäätymisrintamaan, aluksi kapillaarihuokosia pitkin, mutta myöhemmin huokosveden jäädyttyä mineraalirakeiden ja jään välissä olevan jäätymättömän adsorptiovaipan kautta (Konrad and Morgenstern 1980, Saarelainen 1986, Kujala 1991).

Lämpötilan edelleen laskiessa löyhästi sitoutunut vesivaippa alkaa jäätymä tiukasti sitoutuneen vesivaipan edelleen pysyessä sulana (Nieminen 1985, Anderson 1989). Tällöin esimerkiksi  $-5^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa saattaa Andersonin (1989) mukaan olla vielä jäätymätöntä vettä 12% jäätyneen veden tilavuudesta. Vasta usean miinusasteen lämpötilassa adsorptiovesi jäätyy niin merkittävästi, että veden virtaus jäätymisrintamaan käytännössä estyy. Jäätymätöntä liikkuvaa vettä on kuitenkin todettu esiintyvän vielä  $-40^{\circ}\text{C}$ :n lämpötiloissa (Anderson 1989) ja käytännössä täydellinen jäätyminen tapahtuu vasta n.  $-70^{\circ}\text{C}$ :n lämpötilassa (Tsytovic 1986).

Jäätymistapahtumaa kontrolloi edelleen veteen liunneen suolojen määrä (reliktinen suola tai hydrolyysireaktioiden tuotteet), jotka Kujalan (1991) mukaan alentavat vapaan energian määrää ja näin ollen alentavat jäätymispistettä. (Saarenketo 1995)

### 3 IMUPAINEKOKEEN PERUSTEET

Imupainekokeen perimmäisenä tarkoituksena on saada selville materiaalin negatiivinen huokosvedenpaine eli materiaalin kyky imeä vettä huokostilaansa. Koejärjestelyt on pyritty mallintamaan luonnonolosuhteita vastaaviksi järjestämällä materiaalin välittömään läheisyyteen vapaata vettä.

#### 3.1 Mittausmenetelmät

Materiaalin imupainetta pyritään mallintamaan dielektrisyys- ja sähkönjohtavuus mittausten avulla. Mittaus tapahtuu Adek Ltd:n valmistamalla sähkönjohtavuus- ja dielektrisyys mittarilla pintasondia käyttäen.

#### 3.2 Dielektrisyiden- ja sähkönjohtavuuden mittaus

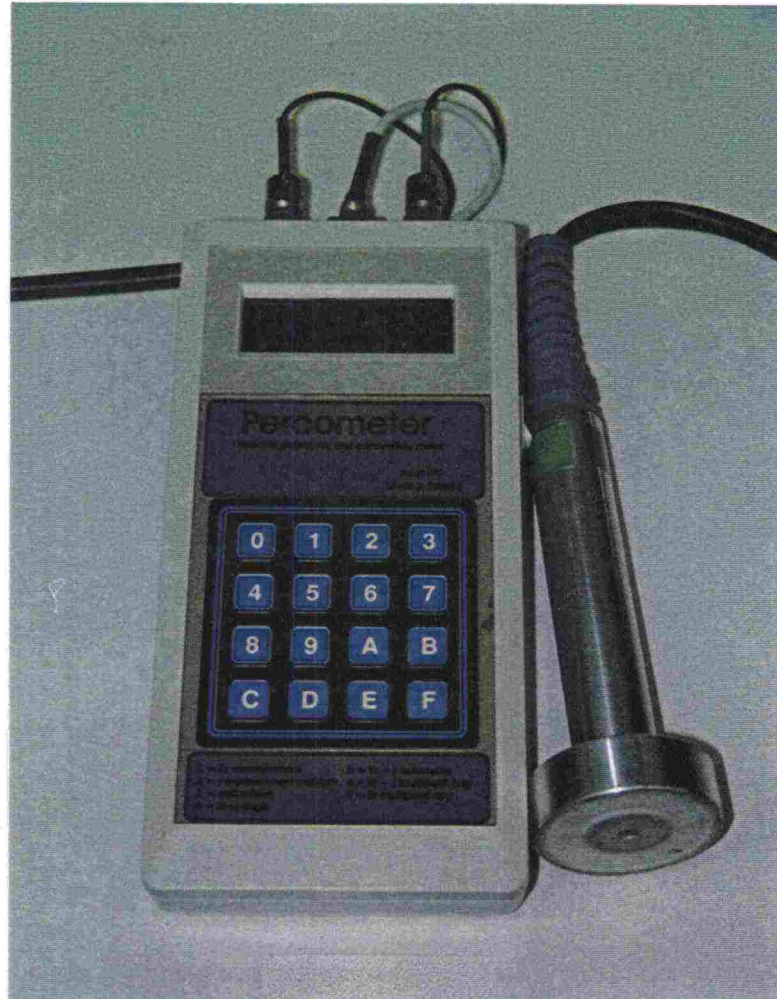
Materiaalin dielektrisiä ominaisuuksia voidaan mitata usean menetelmän avulla. Laboratoriossa käytettyjä menetelmiä ovat mm. TDR-tekniikka (Fellner-Feldegg 1969, Kujala 1991, Sutinen 1992, Ravaska ja Saarenketo 1993). Toinen viime vuosina yleistymässä oleva laboratoriomenetelmä on Surface Network Analyser tekniikka (Campbell 1990, Lau et al. 1992), jonka etuna on se, että samalla kertaa voidaan mitata dielektrisyysvakion reaali- ja imaginaarikomponentti usealla eri taajuudella. Tämän menetelmän haittapuolena on puolestaan se, että mittauksia voidaan suorittaa vain homogeenisistä ja hienorakeisista materiaaleista.

Lapin tiepiirissä on käytetty dielektrisyystutkimuksissa jo useamman vuoden ajan virolaisen Adek Ltd:n kehittämää dielektrisyys- ja sähkönjohtokysondia (Plakk 1994), jonka mittaus perustuu kapasitanssin muutosten mittauksiin tutkittavassa materiaalissa.

Kapasitanssin muutos voidaan määritellä seuraavasti

$$\Delta C = C_s(e_r - 1),$$

missä  $C_s$  on sondin aktiivinen kapasitanssi ja  $e_r$  tutkittavan aineen relatiivinen permittiivisyys (Plakk 1994). Sondin keskitaajuus on valmistajan ilmoituksen mukaan 50 MHz (25-60), mikä taajuus soveltuu esimerkiksi Campbellin (1990) tutkimusten mukaan hyvin mineraalisten aineiden tutkimuksiin. Lisäksi taajuus on verrattain lähellä käytettyjä maatumkataajuuksia. Samalla sondilla voidaan mitata tutkittavan aineen sähkönjohtokyky induktanssimenetelmällä 75 KHz:n keskitaajuudella (Plakk 1994). Kapasitanssin muutoksiin perustuvia kosteusmittareita ovat tehneet myös mm. Troxler.



*Kuva 7. Sähkönjohtavuuden ja dielektrisyyden mittari (Percometer)*



## 4 LABORATORIOKOKKEET

Tutkimuksessa kantavan kerroksen materiaalien imupaineominaisuuksia tutkittiin Lapin tiepiirissä kehitetyllä imupainekokeella (TS-testi) ja vastaavasti lujuusominaisuuksia halkaisuvetolujuuskokein. Pakkaskestävyyttä tutkittiin ns. routasyklin avulla, joka perustui saksalaisiin ohjeisiin. Muut tarvittavat laboratoriokokeet tehtiin PANK ry:n ohjeiden mukaisesti.

### 4.1 Laboratoriokokeiden suorittaminen

Kaikki tutkimukseen kuuluvat laboratoriokokeet suoritettiin Tielaitoksen Lapin tiepiirin keskuslaboratoriossa vuoden 1997 aikana.

#### 4.1.1 Imupainekoe

Lapin tiepiirissä kehitettiin TS-testi (Tube Suction Test), jota myös kutsutaan imupainekokeeksi, kuvaamaan kantavan kerroksen materiaalien kosteustasapainoa.

Kokeessa kantavan kerroksen materiaali (#0-18 mm) tiivistetään kiertotiivistimen (ICT) avulla optimivesipitoisuudessa 305 mm korkeaan ja 152 mm halkaisijaltaan olevaan muovilieriöön. Tiivistämisen jälkeen putken pohjalle asetetaan reiällinen kansi, jonka jälkeen putkinäytteet laitetaan uuniin 45°C:een kuivaamaan, kunnes näytteiden paino ei enää huomattavasti muutu. Uunikuivatuksen jälkeen näytteet annetaan tasaantua huoneenlämmössä vähintään 2 vrk:ta. Lämmön tasaantumisen jälkeen näytteet asetetaan altaaseen, jonka pohjalla on noin 20 mm tislattua vettä.



Kuva 8. Imupainekokeen järjestelyt

Näytteen pinnan ollessa epätasainen voidaan pinta tasata kyseisen materiaalin hienolla aineksella (<2 mm), jotta dielektrisyiden ja sähkönjohtavuuden mittauksessa pintasondin kontaktipinta olisi parempi.

Ensimmäinen dielektrisyiden ja sähkönjohtavuuden mittaus suoritetaan kuitenkin ennen näytteiden veteen laittamista, jonka jälkeen mittauksia suoritetaan ensimmäisenä päivänä kahden tunnin välein (klo. 8.00, 10.00, 12.00, 14.00, 16.00), lisäksi suoritetaan yksi mittaus noin puolen tunnin kuluttua näytteiden veteen laittamisesta. Toisesta päivästä lähtien mittauksia suoritetaan vain aamuisin (1 mittaus/vrk), kunnes näytteiden paino ja dielektrisyys alkavat tasaantua. Jokaisen mittauksen yhteydessä mitataan myös näytteiden paino. Kokeen jälkeen näytteistä määritetään rakeisuus, pintakosteus (5cm), kokonaiskosteus, kiintotiheys ja muut tarvittavat parametrit.

Imupainekokeen suorittaminen bitumilla sidotuille näytteille on suurelta osin samanlainen kuin sitomattomien näytteiden osalta. Massa valmistettiin laboratoriosekoittimella kussakin jäännösbitumipitoisuudessa, jonka jälkeen massa tiivistettiin kiertotiivistimen (ICT) avulla muovilieriöön.

Kiertotiivistimen asetusten erot sitomattomien ja bitumilla sidottujen näytteiden valmistamisessa ilmenevät allaolevasta taulukosta.

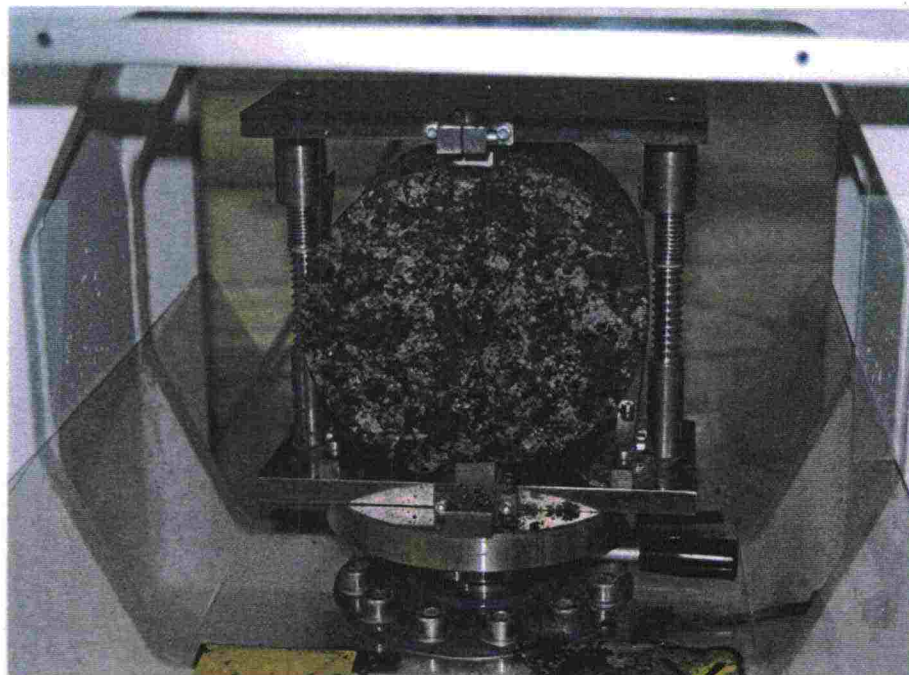
	<i>Sitomaton</i>	<i>Sidottu</i>
Mittaripaine	6.0 bar	3.6 bar
Poikkeutuskulma	2°17"	2°17"
Poikkeutuskulman tangentti	4 %	4 %
Kierrosmäärä	100	100
Kierrosnopeus	32 kier/min	32 kier/min

*Taulukko 2. Kiertotiivistimen asetukset putkinäytteiden valmistamisessa*



#### 4.1.2 Halkaisuvetolujuus-koe

Halkaisuvetolujuus-kokeet suoritettiin hydraulisen puristimen (ACAP-laite) avulla. Halkaisuvetolujuuskokeilla pyrittiin mallintamaan normaalissa tierakenteessa esiintyviä kuormituksen aiheuttamia vetojännityksiä, jotka yleensä aiheuttavat kulutuskerroksen halkeilua. Kokeessa saatujen murtolujuuksien avulla voitiin määrittää näytteiden halkaisuvetolujuudet.



Kuva 9. Halkaisuvetolujuus-koe laitteisto



#### 4.1.3 Routasykli

Routasykli toteutettiin saksalaisten normien pohjalta, missä sidottujen näytteiden annettiin jäätyä ja sulaa useita (12kpl) peräkkäisiä kertoja. Yhden routasyklin pituus oli yksi vuorokausi, jonka aikana näytteet olivat kolme tuntia jääkaapissa (0°C), 14 tuntia pakastimessa (-17°C) ja kahdeksan tuntia huoneenlämmössä (+20°C). Routasyklin vaikutusta näytteiden lujuusarvoihin tutkittiin halkaisuvetolujuuskokein. Laitteistona routasyklin toteuttamiseen tarvittiin ainoastaan jääkaappi, pakastin ja ajastin.

	Lämpötila	Aika	Kesto
Jääkaappi	+20°C ... 0°C	13.00 - 16.00	3 h
Pakastin	0°C ... -17°C	16.00 - 06.00	14 h
Huoneenlämpö	-17°C ... +20°C	06.00 - 13.00	7 h

Taulukko 3. Routasyklin toteutus

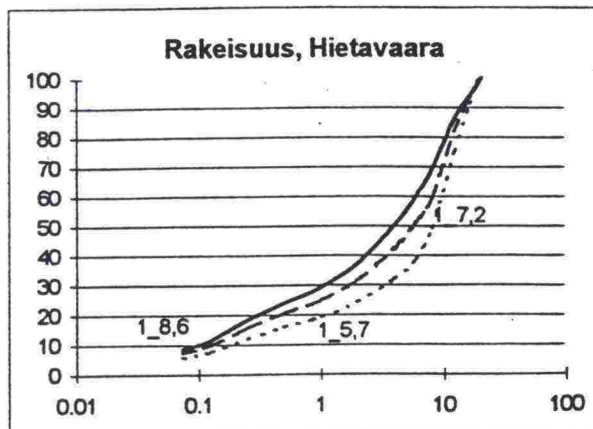
#### 4.2 Laboratoriokokeissa käytetyt murskeet

Tutkimukseen valittiin kuusi Lapin tiepiirin (murskenäytteet 1-6) ja kaksi Vaasan tiepiirin (murskenäytteet 7 ja 8) alueelta olevaa mursketta, joiden rakeisuudet on esitetty tämän tutkimusselostuksen sivuilla 27 ja 28. Valintoja tehdessä pyrittiin valitsemaan vähintään kaksi kutakin ns. päätyyppiä olevia murskeita, jotta vertailukelpoisuus säilyisi. Päätyypit tässä tapauksessa olivat 1. ongelmalliset Ca- ja Mg-rikkaat murskeet, 2. ongelmalliset kiillerikkaat murskeet, joissa voi olla korkea Al-pitoisuus, ja 3. käytössä ja tutkimuksissa hyvälaatuisiksi osoittautuneet murskeet.

Tutkimuksen toiseen vaiheeseen, jossa tutkittiin bitumilla sidottujen murskeiden imupaineominaisuuksia valittiin vain kuusi mursketta (1, 2, 4, 6, 7 ja 8). Valinnan perusteluina käytettiin aikaisemmin ko. materiaaleille tehtyjä tutkimuksia.

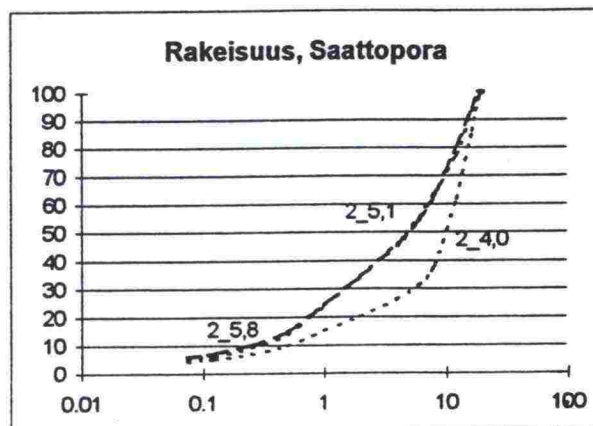
### 1. Hietavaara

- Rovaniemen maalaiskunta
- aikaisemmin hyvä soramurske



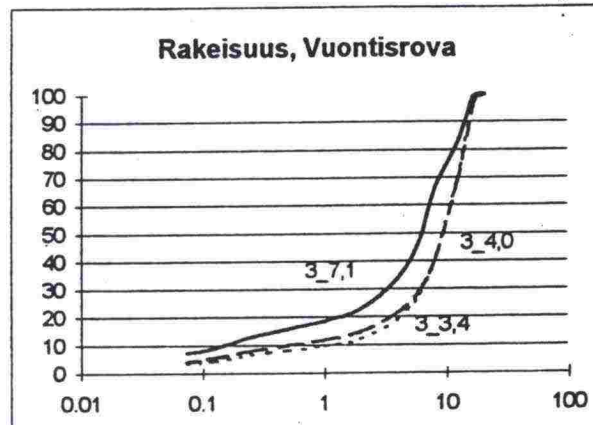
### 2. Saattopora

- Kittilä
- epäilyttävä soramurske



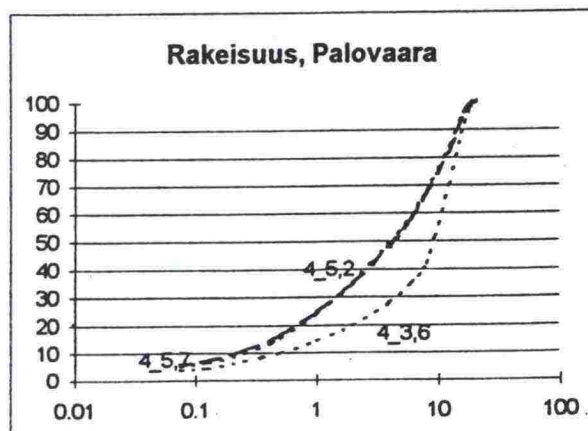
### 3. Vuontisrova

- Muonio
- hyvä kalliomurske, korkea CEC



### 4. Palovaara

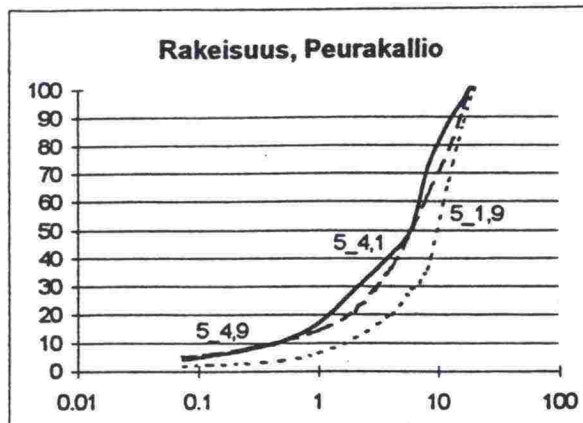
- Kittilä
- ongelmallinen soramurske



Kuva 10. Näytteiden 1-4 rakeisuudet

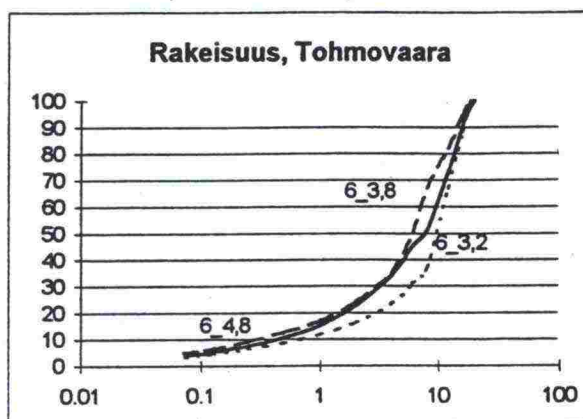
### 5. Peurakallio

- Tomio
- hyvä kalliomurske,  
päällystemurske



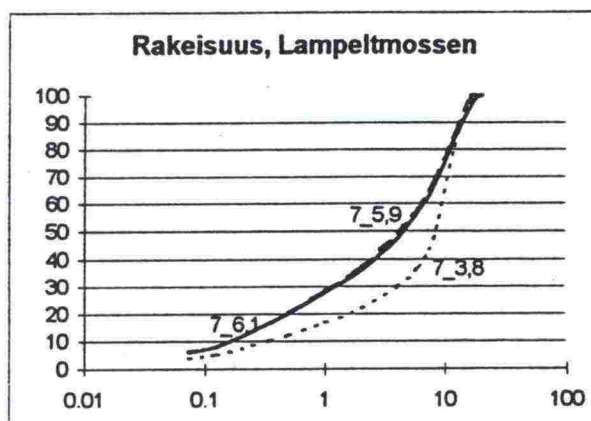
### 6. Tohmovaara

- Kemijärvi
- hyvälaatuinen  
kalliomurske



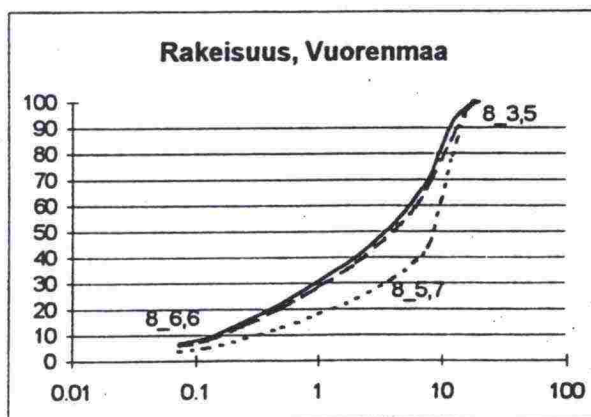
### 7. Lampeltmossen

- Vöyri
- ongelmallinen  
kiillemurske



### 8. Vuorenmaa

- Kauhava
- ongelmallinen  
kiillemurske



Kuva 11. Näytteiden 5-8 rakeisuudet



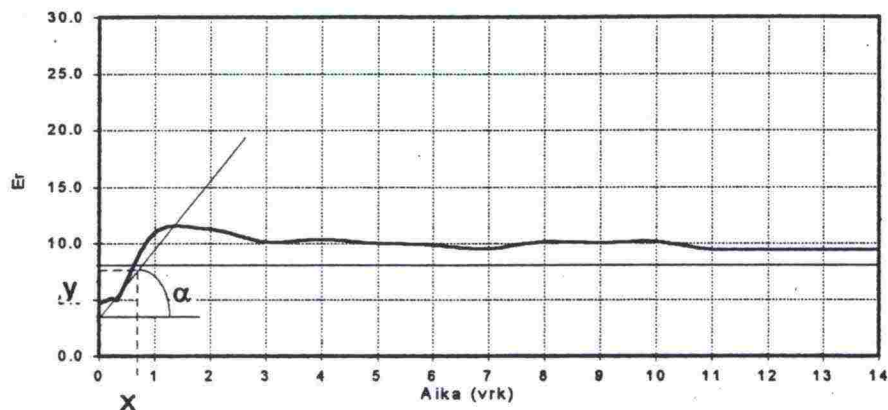
## 5 TUTKIMUSTULOKSET JA TUTKIMUSTULOSTEN KÄSITTELY

Tutkimustulokset ovat kokonaisuudessaan esitetty tämän tutkimusraportin liitteissä. Liitteistä on luettelo sivulla 39.

### 5.1 Tulosten esittäminen

Tutkimuksessa saatujen dielektrisyys ja sähkönjohtavuus mittaustulosten käsittelyn helpottamiseksi luotiin tietokoneella taulukkolaskentapohja, jonka avulla saatiin jokaisella materiaalille dielektrisyys-kuvaaja. Dielektrisyys-kuvaajan vaaka-akselina käytettiin aikaa ja vastaavasti pystyakselina dielektrisyttä (LIITE 1).

Dielektrisyys-kuvaaja

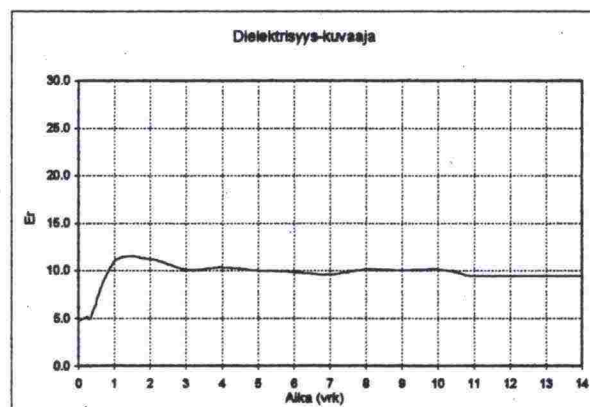


Kuva 12. Dielektrisyys-kuvaajasta saatavat parametrit

Dielektrisyys-kuvaajien avulla määritettiin materiaaleille kolme eri parametria; kuvaajan kulmakerroin, vaaka-asymptootti ja  $E_r$ -arvoa 9 vastaava aika. Kyseisiä parametreja ja muita laskennallisesti saatuja suureita (kosteudet, rakeisuudet, tiheydet, jne.) apuna käyttäen pyrittiin havainnollistamaan eri materiaalien imupaineominaisuuksia.

Aika	$E_r$	Leikkauspisteet
0	4.5	
0.5 h	4.7	
2 h	4.8	
4 h	5.0	kulma 80.7
6 h	5.1	
8 h	4.9	
1	10.9	
2	11.2	$E_r(9)$ 0.8
3	10.1	
4	10.3	
5	10.0	
6	9.8	Huomautuksia # 0.074 mm 5.10% ved. ads. 1.74 w-% (5cm) 3.63% w-% 4.33%
7	9.5	
8	10.1	
9	10.0	
10	10.1	
11	9.4	
12	9.4	
13	9.4	
14	9.4	

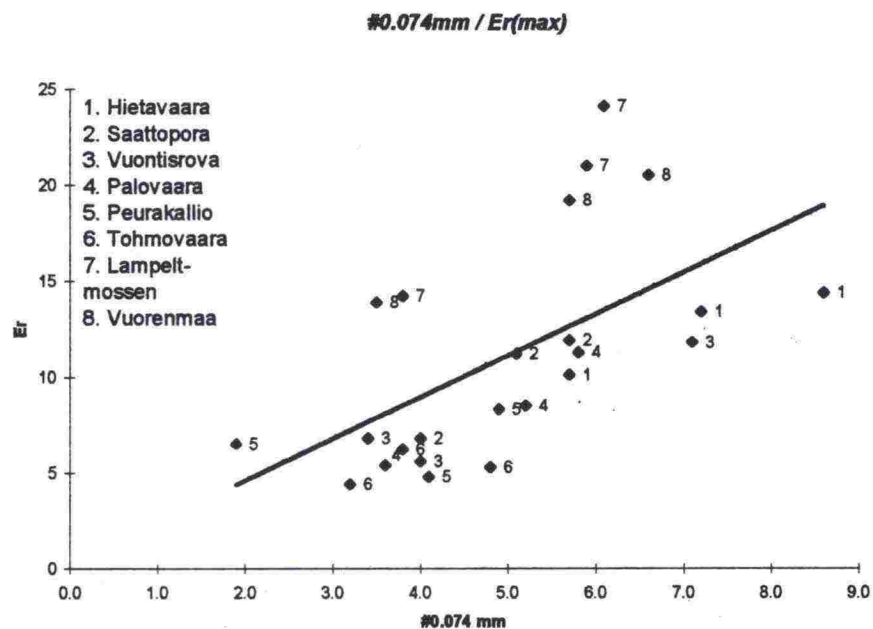
Saattopora, 2\_5,1



Kuva 13. Esimerkki dielektrisyys-kuvaajista (Saattopora)

## 5.2 Sitomattomat murskenäytteet

Tutkimustuloksista voidaan nähdä materiaalin hienoaineksen määrän ja dielektrisyys-arvojen (min/max) selvä korrelointi keskenään (LIITE 3, 1-2/4). Materiaalin hienoaineksen (#0.074mm) määrän kasvaessa lähes kaikilla murskeilla dielektrisyiden arvot nousivat. Tutkimus osoitti myös, että dielektrisyiden ja materiaalin hienoaineksen suhde on materiaali-kohtainen. Esimerkiksi korkeimmat dielektrisyiden arvot saaneella Lampeltmossenin murskeella hienoaineksen (#0.074mm) läpäisyprosenttia 3.8% vastaava dielektrisyiden arvo oli 14.2 ja Tohmovaaran murskeen vastaavalla hienoaineksen määrällä saatiin dielektrisyiden arvoksi 6.2.



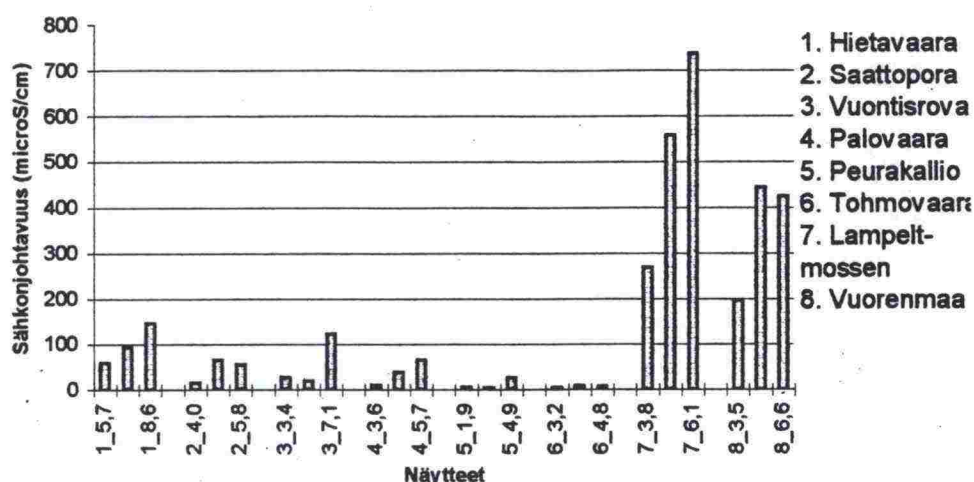
Kuva 14. Hienoaineksen suhde dielektrisyiden maksimiarvoon

Materiaalin hienoaineksen ja dielektrisyiden suhdetta (Kuva 14) tarkasteltaessa voidaan nähdä selvästi materiaalien erot, joissa Lampeltmossenin ja Vuorenmaan murskeet erottuvat selvästi toisista. Materiaali voidaan luokitella hyväksi, jos dielektrisyiden arvot jäävät alle 10:n hienoainesmäärän kasvaessakin. Vastaavasti materiaali luokitellaan erittäin huonoksi, jos dielektrisyiden arvot ylittävät arvon 16 jo alhaisilla hienoainesmäärillä.

Tarkasteltaessa materiaalien dielektrisyiden arvoja ennen imupaine-koetta (LIITE 2, 7/8), ei huomattavaa eroa materiaalien kesken löydy. Dielektrisyiden arvot vaihtelivat välillä 2.7 - 4.5 rakeisuudesta riippuen.

Dielektrisyysmittausten yhteydessä tehdyt sähkönjohtavuuden mittaukset (LIITE 2, 8/8) osoittivat suurimmat arvot Lampeltmossenin ja Vuorenmaan murskeille, joille myös dielektrisyiden arvot olivat suurimmat. Muille murskenäytteille Hietavaaraa lukuunottamatta sähkönjohtavuuden arvot olivat erittäin pieniä, mutta tuloksista nähtiin hienoainesmäärän sähkönjohtavuutta nostattava vaikutus.

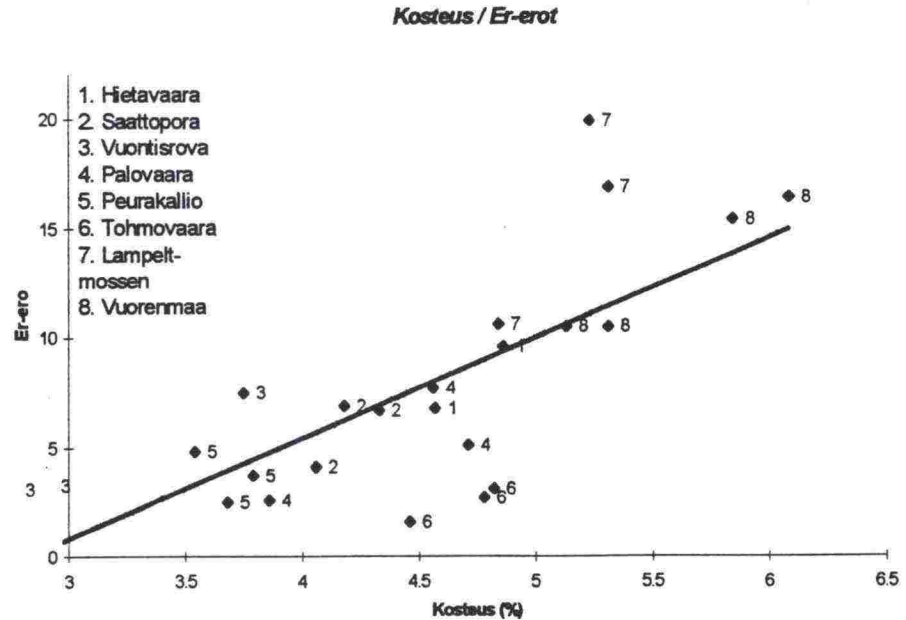
Näytteiden sähkönjohtavuudet



Kuva 15. Näytteiden sähkönjohtavuudet

Materiaalin kosteuksien (pintakosteus 5cm ja kokonaiskosteus), dielektrisyys-arvojen ja hienoainesmäärien yhteydet olivat hyvin selvät (LIITE 3, (3-4/4)). Kuten dielektrisyys ja sähkönjohtavuus arvoissa suurimmat kosteudet tulivat Lampeltmossenin ja Vuorenmaan murskeille. Myös Hietavaaran murskeen kosteuspitoisuudet olivat melko suuret kuten dielektrisyysarvotkin. Tohmovaaran murskeen osalta suhteellisen suuret kosteuspitoisuudet eivät vaikuttaneet materiaalin dielektrisyys-arvoihin.





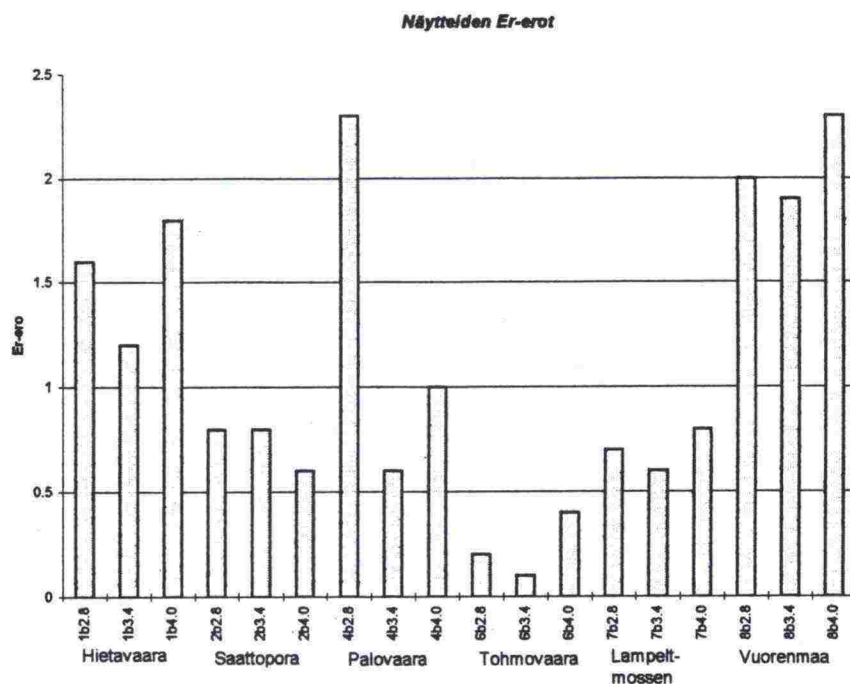
Kuva 16. Näytteiden kosteuksien korrelointi dielektrisyysiin

Tutkittaessa huokosluvun sekä hienoaineksen ja dielektrisyys-arvojen välistä yhteyttä (LIITE 2, 6/8), voidaan havaita, että hienoaineksen ja dielektrisyys-arvojen noustessa huokosluku pienenee. Tämän ilmiön selittää materiaalin tiivistymiskäyttäytyminen eli mitä paremmin materiaali tiivistyy sen pienempi on huokosluku ja paras tiivistyminen saavutetaan, kun riittävä hienoainesmäärä täyttää kaikki ilmahuokokset. Tiivistyminen selittää myös kuivairtohiyksen kasvun hienoainesmäärän kasvaessa.

Yhteenvetona sitomattomien murskeiden tutkimustuloksista voidaan päätellä, että suurin materiaalin imupaineeseen vaikuttava tekijä on materiaalin hienoaineksen määrä ja laatu. Toisaalta voitiin todeta myös kiilteen ja suolan imupainetta nostattava vaikutus. Nämä tulokset vahvistavat suction teoriaa, jossa kokonaissuction koostuu matric suctionista ja osmoottisesta suctionista.

### 5.3 Bitumilla sidotut murskenäytteet

Tarkasteltaessa näytteiden dielektrisyysarvoja imupainekokeen aikana (LIITE 4, 2/6) voidaan havaita lähes sama tulos kuin sitomattomien murskenäytteiden osalta, eli suurimmat dielektrisyysarvot saavuttivat Vuorenmaan ja Hietavaaran murskeet. Lampeltmossenin, Palovaaran ja Saattoporan näytteillä oli tässä tapauksessa hieman pienemmät dielektrisyysarvot kuin suurimmat arvot saavuttaneilla murskeilla. Mutta yleisesti ottaen ero suurimman (Vuorenmaa) ja pienimmän (Tohmoaara) dielektrisyysarvon saaneen näytteen välillä oli melko pieni (2 yksikköä), verrattuna sitomattomien vastaaviin tuloksiin.

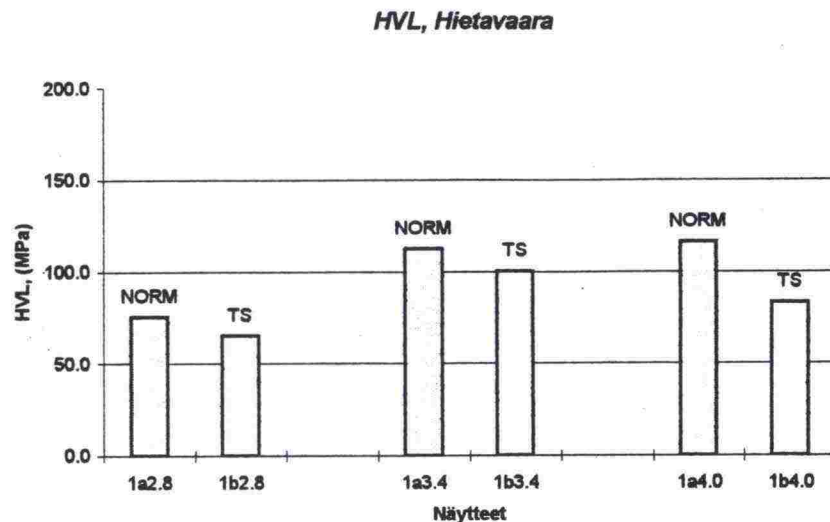


Kuva 17. Näytteiden dielektrisyysarvojen (max-min) erot

Materiaalien imupainekokeen aikana imemät pienet vesimäärät ja pienet dielektrisyysarvot (LIITE 8, 1-3/9) osoittavat bitumiemulsion tehokkuuden, suhteellisen suurista tyhjätiloista huolimatta. Suurimmat kosteudet olivat Palovaaran näytteillä (LIITE 4, 6/6), joilla myös dielektrisyysarvot olivat melko suuret. Tohmoaaran näytteillä ilmeni suuret kosteuspitoisuudet ja tyhjätilat pienistä dielektrisyys-arvoista huolimatta. Ilmeisesti Tohmoaaran murskeen vedenkestokyky on muita murskeita huomattavasti parempi.

Lähes kaikissa tutkituissa murskeissa bitumipitoisuuden kasvattamisella ei ollut suurta merkitystä halkaisuvetolujuuden arvoihin, eli jo melko alhaisilla jäännösbitumipitoisuuksilla saavutettiin suhteellisen korkeita lujuusarvoja (LIITE 5).

Imupainekokeen vaikutus halkaisuvetolujuuksiin määritettiin tekemällä halkaisuvetolujuusmäärytykset ennen ja jälkeen imupainekoetta. Saadut halkaisuvetolujuudet osoittivat lähes poikkeuksetta imupaine-kokeen alentavan lujuuksia. Syynä tähän ilmiöön oli imupainekokeen aikana näytteisiin imeytynyt vesi, joka alensi huomattavasti lujuuksia.



*Kuva 18. Imupainekokeen vaikutus halkaisuvetolujuus arvoihin (esim. Hietavaara)*

Bitumilla sidotuille murskenäytteille tehdyissä routasykli-kokeissa ilmeni koejärjestelyissä hieman puutteita. Routasyklissä näytteisiin imupainekokeen aikana imeytynyt vesi pääsi haihtumaan, joka taas aiheutti halkaisuvetolujuuksien nousemisen routasyklin aikana. Routasyklin aikana haihtuneet vesimäärät olivat noin puolet näytteiden kokonaiskosteuksista (LIITE 5, 7-8/8).

Sidottujen murskeiden osalta todettiin etenkin bitumiemulsion tehokkuus imupaineen pienentäjänä. Jo erittäin alhaiset jäännösbitumipitoisuudet pystyivät lähes kokonaan kumoamaan imupaineen vaikutukset.



## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Arvioitaessa kantavan kerroksen murskeiden vedenherkkyttä eli imupaineominaisuuksia TS-kokeen avulla, voidaan materiaalit luokitella saatujen dielektrisyys-mittaustulosten perusteella hyviksi, kohtalaisiksi tai huonoiksi. Apuna luokittelussa käytetään dielektrisyys-kuvaajaa, joka näyttää dielektrisyys-arvon ajan funktiona. Dielektrisyys-kuvaajasta voidaan lukea materiaalin suurin mitattu dielektrisyiden arvo ja sitä vastaava aika, jota myös osaltaan kuvastaa kuvaajan kulmakerroin.

Kantavan kerroksen murskeiden laatua arvioitaessa, voidaan hyvän murskeen dielektrisyiden ylärajana pitää arvoa 9. Vastaavasti dielektrisyiden ylittäessä arvon 16 voidaan materiaali luokitella erittäin huonoksi, maanrakennusmateriaaliksi kelpaamattomaksi ilman lisätoimia (esimerkiksi bitumilla sitominen). Tällaisessa tapauksessa materiaalit yleensä menettävät kantavuutensa ja ovat routivuuden kannalta erittäin ongelmallisia.

Sitomattomien murskeiden osalta tutkimus osoitti materiaalin hienoaineen suuren vaikutuksen imupaineominaisuuksiin. Jo erittäin pienillä rakeisuuden (hienoaines) muutoksilla päästiin pienempiin dielektrisyiden arvoihin ja sitä kautta pienempiin imupaineisiin. Saaduista tuloksista voitiin hyvin selkeästi nähdä materiaali-kohtainen dielektrisyiden, hienoaineen määrän (#0.074mm) ja kosteuksien keskinäinen riippuvuus.

Bitumilla sidotuille murskeille tehdyt kokeet osoittivat tutkimuksessa käytetyn bitumiemulsion (BIE300) hyvin tehokkaaksi imupaineen pienentäjäksi. Tutkimuksessa käytetyillä jäännösbitumipitoisuuksilla ei saatu kovinkaan suurta eroa halkaisuvetolujuuskokeissa.

Haluttaessa pienentää kantavan kerroksen materiaalin vedenherkkyttä eli imupainetta, tulisi kiinnittää erityinen huomio materiaalin hienoaineen määrään. Samoin esimerkiksi materiaalin sitominen bitumilla näyttää tuovan selkeän ratkaisun ongelmaan. Sidottaessa kantavan kerroksen materiaalia bitumilla, tulisi tarvittava bitumipitoisuus selvittää tapauskohtaisesti, koska imupaineen pienentäminen voi tapahtua jo erittäin alhaisilla bitumipitoisuuksilla.

Tutkimuksen aikana saadut kokemukset uudesta dielektrisyiden- ja sähkönjohtavuuden mittarista, Percometer, olivat päällisin puolin myönteisiä. Alkukalibrointien jälkeen mittari toimi moitteettomasti. Etuna edelliseen malliin (analoginen) verrattuna voidaan pitää digitaalista näyttöä, jonka avulla voidaan karsia pois eri mittajista aiheutuvat lukemavirheet.

Mahdollisissa jatkotutkimuksissa tulisi keskittyä etupäässä bitumilla sidottujen murskeiden imupaineominaisuuksien tutkimiseen ja etenkin erilaisten bitumilaatujen (viskositeetti) ja bitumipitoisuuksien käytön vaikutusten arviointiin. Samalla selvitetäisiin mahdollisuuksia pienentää esimerkiksi Remixer-stabiloinnissa käytettyjä bitumipitoisuuksia ja täten mahdollistaa huomattavien säästöjen aikaansaamisen.

## KIRJALLISUUSLUETTELO

- Anderson, T.M. 1989. Frost heave properties of soils. In Frost in geotechnical engineering. Volume 1. International Symposium, Saariselkä, Finland, 13-15 March, 1989.
- Annan, A.P., Davis, J.L. and Scott, W.J. 1975. Impulse Radar Wide Angle Reflexion and Refraction Sounding in Permafrost. Geological Survey of Canada, Paper 75-1c.
- Campbell, 1990. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty Megahertz. Soil. Sci. Soc. Am. J.
- Doolittle, J.A. and Rabertus, R.A. 1988. Ground Penetrating Radar as a Means of Quality Control for Soil Surveys. Washington D.C., USA. Soil Engineering, Transportation Research Record 1192.
- Fellner-Feldegg, H. 1969. The Measurement of Dielectrics in the Time Domain. The Journal of Physical Chemistry 73 (3).
- Joseph, P.C., Joseph, J.C., Glynn, D.P. and Perkins, T.O. 1994. A Portable Vector Reflectometer and Its Application for Thickness and Permittivity Measurements. Microwave Journal, VOL. 37, NO12. December 1994.
- Kerkelä, S. 1990. Dielektrisyysarvo ja teiden rakennekerrosten mittaaminen maatuokalla. Diplomityö Oulun yliopiston rakentamistekniikan osastolla. Oulu.
- Knight, R. and Knoll, M. 1990. The effect of saturation history on electrical properties of the unsaturated zone. Third International Conference on Ground Penetrating Radar.
- Konrad, J.M. and Morgenstern, N.R. 1980. A mechanistic theory of ice formation in fine grained soils. Can. Geotech. J. 17.
- Kujala, K. 1991. Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils. Acta Univ. Oul. C58.
- Lau, C.L., Scullion, T. and Chan, P. 1992. Using Ground Penetrating Radar technology for pavement evaluations in Texas, USA. Geological Survey of Finland, Special Paper 16.
- Maatutkaluotaus, 1992. Kust. Suomen geoteknillinen yhdistys ja Rakentajain Kustannus Oy.
- Maijala, P. 1991. Maatutkaluotausaineisto ja sen käsittely, Oulu. Oulun yliopisto, Geofysiikan laitos, Tutkielma.
- Marjeta, J. 1993. Dielektrisyysmittarin käyttö murskeiden kosteuksien mittaukseen ja murskeiden laadun arviointiin. Insinööritö, Rovaniemi Institute of Technology, Department of Construction Technology.



Maser, K.R. and Scullion, T. Automated Pavement Subsurface, Profiling Using Radar - Case Studies of Four Experimental Field Sites. Preprint, paper no. 91. Transportation Research Board 70th Annual Meeting, January 13-17, 1991, Washington, D.C.

Parry, N.S. and Davis, J.L. 1992. GPR systems for roads and bridges. Geological Survey of Finland, Special Paper 16.

Peltoniemi, M. 1988. Maa- ja kallioperän Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät, Otaniemi. Tekijät ja Otakustantamo 1988. Karisto Oy, Hämeenlinna 1988.

Pernu, T. 1991. Model and Field studies of direct current resistivity measurement with the compined (half- Schlumberger) array AMN, MNB. Acta Universitas Ouluensis. Ser A. Sci. rev. Nat 221,71.

Plakk, T. 1994. HF Permitivity measurements by capacitive probe. Julkaisematon artikkeli.

Päällystealan neuvottelukunta, PANK ry, Asfalttinormit 1995. Painatuskeskus Oy,, Helsinki 1995.

Rantamäki, M. & Jääskeläinen, R. & Tamminne, M. Geotekniikka 464, Tekijät ja Otakustantamo 1979. Tammer-Paino Oy, Tampere 1944.

Ravaska, O. and Saarenketo, T. 1993. Dielectric properties of road aggregates and their effect on GPR surveys. Proc. 2nd Int. Symp. on Frost in Geotechn. Eng., Anchorage, USA. Balkema.

Saarelainen, S. 1986. Maan routiminen. Routatutkimusseminaarin Espoo 6.3.1986 esitelmät. Vesihallituksen monistesarja 410.

Saarenketo, T. and Scullion, T. 1997. Using Suction and Dielectric Measurements as Performance Indicators for Aggregate Base Materials, Transportation Research Board, 76 th Annual Meeting, Paper 970141.

Saarenketo, T. and Scullion, T. 1996. "Using Electrical Properties to Classify the Strength Properties of Base Course Aggregates", Research Report 1341-2, November 1995.

Saarenketo, T. and Scullion, T. 1996. Laboratory and GPR Test to Evaluate Electrical and Mechanical Properties of Texas and Finnish Base Course Aggregates, Proceedings of 6th International Conference on Ground Penetrating Radar, Sendai, Japan, September 1996.

Saarenketo, T. 1995. Routa ja maatutka. Routa ja tienrakennus, 14.-15.11.1995, Tornio.

Saarenketo, T. 1995. Tiemateriaalien ja pohjamaan sähköiset ominaisuudet jäätymis-sulamisprosessissa. Routa ja tienrakennus, 14.-15.11.1995, Tornio.



Saksa, P. and Korkealaakso, J. 1987. Application of geophysical methods in environmental and municipal engineering. VTT, Tutkimuksia 505.

Sutinen, R. 1992. Glacial deposits, their electrical properties and surveying by image interpretation and ground penetrating radar, Espoo. Geological Survey of Finland, Bulletin 359. GTK, Vammalan Kirjapaino Oy, Vammala 1992.

Sutinen, R. and Hänninen, P. 1990. Radar profiling and dielectrical properties of glacial deposits in North Finland. proc. 6th International IAEG Congress, Amsterdam, 2.

Tielaitos, Tiehallitus, Geopalvelukeskus, 1990. Laadunvalvontaohjeet, Alusrakenne ja päällysrakenteen sitomattomat kerrokset. Tiehallitus, Geopalvelukeskus, Helsinki 1990.

Triumf, C.A. 1992. Geofysik för geotekniker, metoder och tillämpningar. Byggforskningsrådet, Stockholm. 84.

Tsytovic, N.A. 1975. The mechanics of frozen ground. Swinzow (Ed.), McGraw-Hill Book Company.

Ulriksen, C.P.F. 1992. Application of Impulse Radar to Civil Engineering. Doctoral Thesis. Lund University of Technology. Department of Engineering Geology.

## LIITELUETTELO

### Sitomattomat murskenäytteet:

- Dielektrisyyskuvaajat	LIITE 1 (8)
- Tutkimustulokset	LIITE 2 (8)
- Taulukkomuotoinen esitys	1/8
- #0.074 mm läpäisyprosentit	2/8
- Näytteiden kosteudet TS-testin jälkeen	3/8
- Näytteiden pintakosteudet (5cm)	4/8
- Näytteiden kuivairtoteiheydet	5/8
- Näytteiden huokosluvut	6/8
- Näytteiden Er min/max	7/8
- Näytteiden sähköjohtavuudet	8/8
- Tulosten tulkintaa	LIITE 3 (4)
- #0.074 mm / Er(max)	1/4
- #0.074 mm / Er-erot	2/4
- #0.074 mm / Kosteus	3/4
- Kosteus / Er-erot	4/4

### Bitumilla sidotut murskenäytteet:

- Tutkimustulokset	LIITE 4 (6)
- Taulukkomuotoinen esitys	1/6
- b- ja c-näytteiden Er min/max	2/6
- b- ja c-näytteiden Er-erot	3/6
- b-näytteiden Er min/max	4/6
- b-näytteiden Er-erot	5/6
- b-näytteiden kosteudet TS-testin jälkeen	6/6
- Halkaisuvetolujuudet (HVL)	LIITE 5 (8)
- a- ja b-näytteet	
- Halkaisuvetolujuudet TS-testin jälkeen	LIITE 6 (1)
- Halkaisuvetojäykkyydet	LIITE 7 (8)
- a- ja b-näytteet	
- Tulosten tulkintaa	LIITE 8 (9)
- Kosteus / Er(max)	1/9
- Kosteus / Er-erot	2/9
- Kosteus / Tyhjättila	3/9
- Bitumipitoisuus / Er(max)	4/9
- Bitumipitoisuus / Er-erot	5/9
- Bitumipitoisuus / Kosteus	6/9
- HVL / Er(max)	7/9
- HVL / Er-erot	8/9
- HVL / Kosteus	9/9

### Stabiloinnin vaikutus imeytyneen veden määrään

- #0.074 mm / Kosteus(%)	LIITE 9
--------------------------	---------

Aika	Er	Leikkauspisteet	
0	3.7	y	9.2
0,5 h	3.3	x	0.9
2 h	3.5		
4 h	3.7		
6 h	4.0		
8 h	5.6		
1	10.1		
2	10.1		
3	9.9		
4	9.9		
5	9.9		
6	10.0		
7	10.0		
8	9.9		
9	9.6		
10	9.7		
11	9.4		
12	9.3		
13	9.2		
14	9.1		

Leikkauspisteet

y 9.2  
x 0.9

kulma 80.6

Er (9) 0.8

Huomautuksia

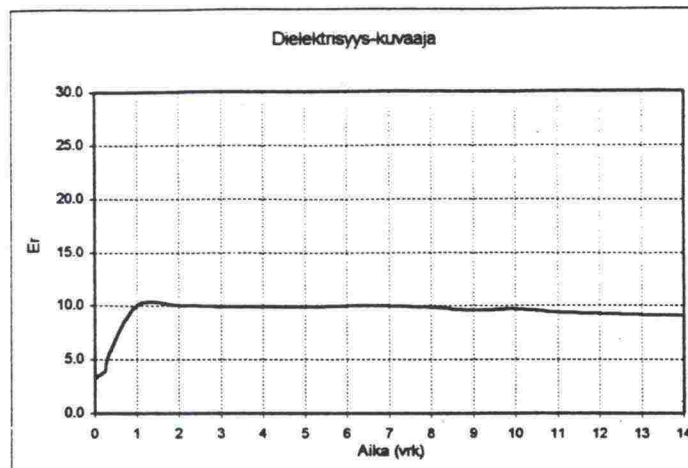
# 0.074 mm 5.70%

ved. ads. 1.44

w-% (5cm) 4.16%

w-% 4.57%

## Hietavaara, 1 5,7



Aika	Er	Leikkauspisteet	
0	3.9	y	12.4
0,5 h	3.8	x	0.4
2 h	4.0		
4 h	4.1		
6 h	5.8		
8 h	10.8		
1	12.1		
2	13.2		
3	13.4		
4	12.6		
5	12.5		
6	12.4		
7	12.4		
8	12.3		
9	12.9		
10	12.4		
11	12.4		
12	12.4		
13	12.4		
14	12.4		

Leikkauspisteet

y 12.4  
x 0.4

kulma 87.3

Er (9) 0.3

Huomautuksia

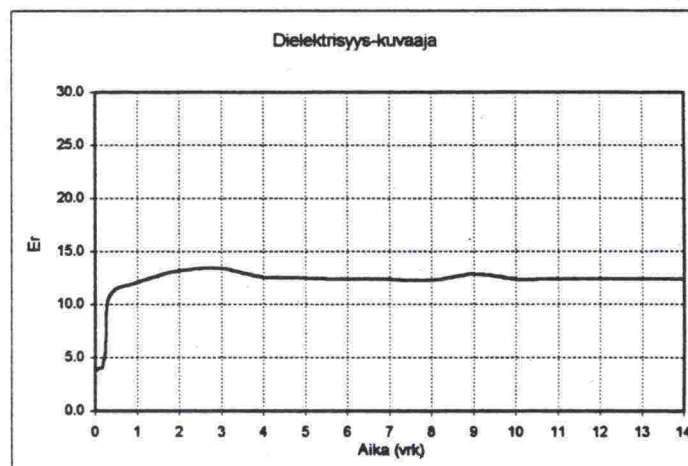
# 0.074 mm 7.20%

ved. ads. 1.44

w-% (5cm) 4.34%

w-% 4.86%

## Hietavaara, 1 7.2



Aika	Er	Leikkauspisteet	
0	3.9	y	13.2
0,5 h	3.9	x	1.1
2 h	4.0		
4 h	4.1		
6 h	4.4		
8 h	8.3		
1	13.3		
2	13.5		
3	14.4		
4	14.0		
5	13.7		
6	13.5		
7	13.3		
8	13.4		
9	13.4		
10	13.2		
11	14.3		
12	13.8		
13	13.4		
14	12.9		

Leikkauspisteet

y 13.2  
x 1.1

kulma 83.2

Er (9) 0.4

Huomautuksia

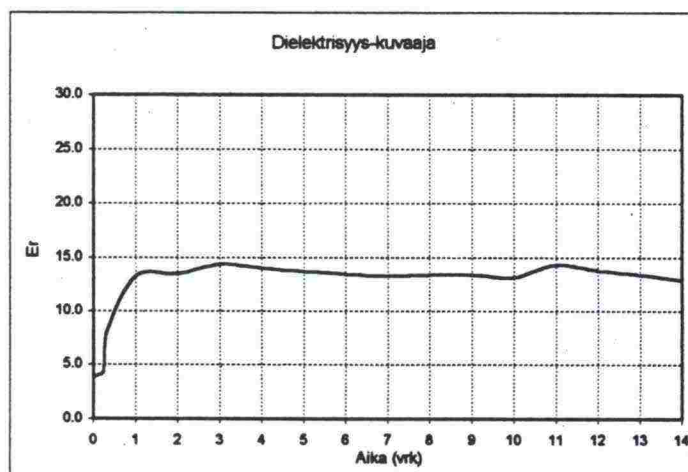
# 0.074 mm 8.60%

ved. ads. 1.44

w-% (5cm) 4.68%

w-% 5.31%

## Hietavaara, 1 8,6





Aika	Er	Leikkauspisteet	
0	2.7	y	6.0
0,5 h	2.9	x	0.9
2 h	3.0		
4 h	3.4		
6 h	3.6		
8 h	3.8		
1	6.5		
2	6.2		
3	6.5		
4	6.8		
5	6.5		
6	6.1		
7	5.9		
8	6.1		
9	5.6		
10	5.9		
11	6.2		
12	6.0		
13	6.0		
14	6.0		

Leikkauspisteet

y	6.0
x	0.9

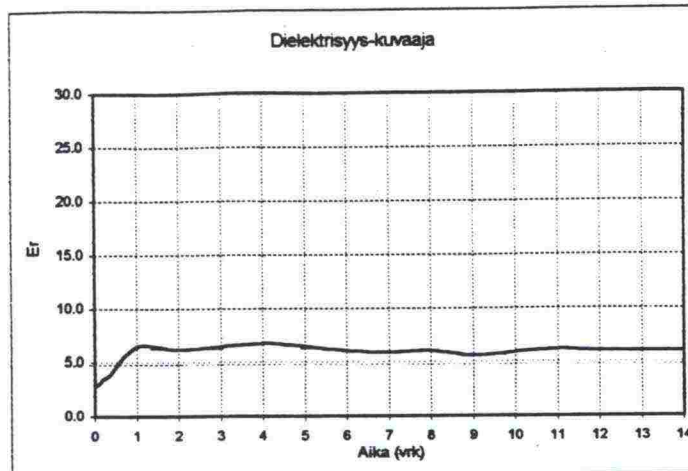
kulma 74.7

Er (9)

Huomautuksia

# 0.074 mm 4.00%  
ved. ads. 1.74  
w-% (5cm) 2.53%  
w-% 4.06%

## Saattopora, 2 4,0



Aika	Er	Leikkauspisteet	
0	4.5	y	9.4
0,5 h	4.7	x	0.8
2 h	4.8		
4 h	5.0		
6 h	5.1		
8 h	4.9		
1	10.9		
2	11.2		
3	10.1		
4	10.3		
5	10.0		
6	9.8		
7	9.5		
8	10.1		
9	10.0		
10	10.1		
11	9.4		
12	9.4		
13	9.4		
14	9.4		

Leikkauspisteet

y	9.4
x	0.8

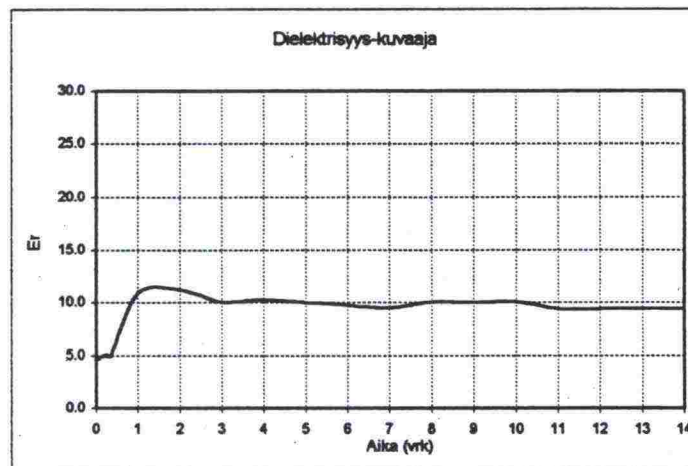
kulma 80.7

Er (9)

Huomautuksia

# 0.074 mm 5.10%  
ved. ads. 1.74  
w-% (5cm) 3.63%  
w-% 4.33%

## Saattopora, 2 5,1



Aika	Er	Leikkauspisteet	
0	4.4	y	9.7
0,5 h	4.4	x	0.8
2 h	4.8		
4 h	4.7		
6 h	5.0		
8 h	4.8		
1	11.3		
2	11.1		
3	10.4		
4	9.6		
5	9.4		
6	9.0		
7	8.9		
8	10.4		
9	10.2		
10	9.7		
11	9.7		
12	9.7		
13	9.7		
14	9.7		

Leikkauspisteet

y	9.7
x	0.8

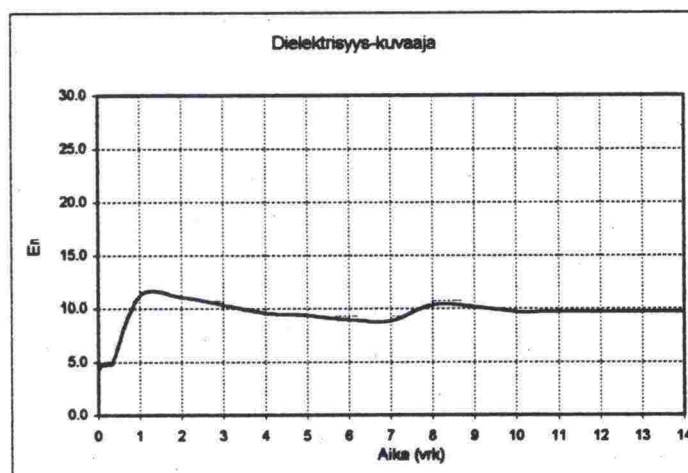
kulma 81.4

Er (9)

Huomautuksia

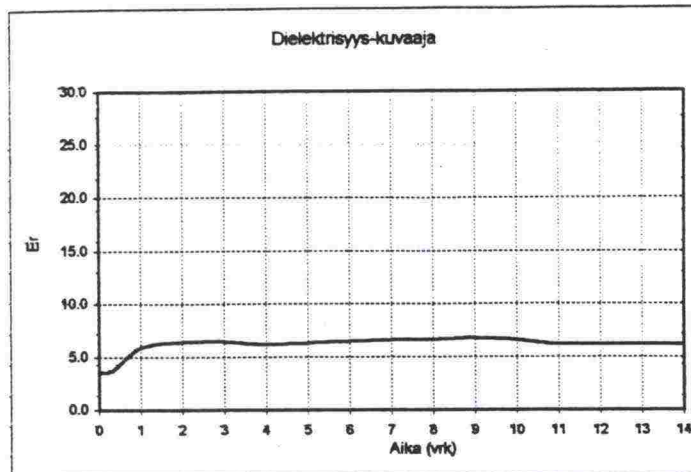
# 0.074 mm 5.80%  
ved. ads. 1.74  
w-% (5cm) 3.59%  
w-% 4.18%

## Saattopora, 2 5,8



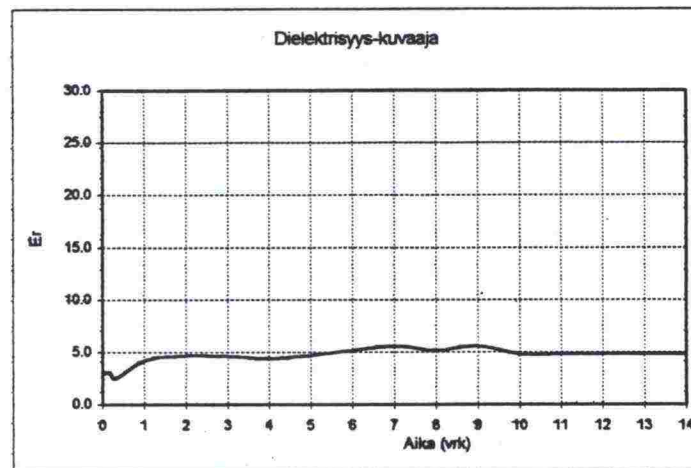
Aika	Er	Leikkauspisteet
0	3.5	
0,5 h	3.5	y   6.2
2 h	3.6	x   1.3
4 h	3.5	kulma   64.3
6 h	3.7	
8 h	3.7	Er (9)
1	5.9	
2	6.4	Huomautuksia
3	6.5	
4	6.2	# 0.074 mm 3.40%
5	6.3	ved. ads. 1.35
6	6.5	w-% (5cm) 2.53%
7	6.6	w-% 2.93%
8	6.6	
9	6.8	
10	6.6	
11	6.2	
12	6.2	
13	6.2	
14	6.2	

## Vuontisrova, 3 3,4



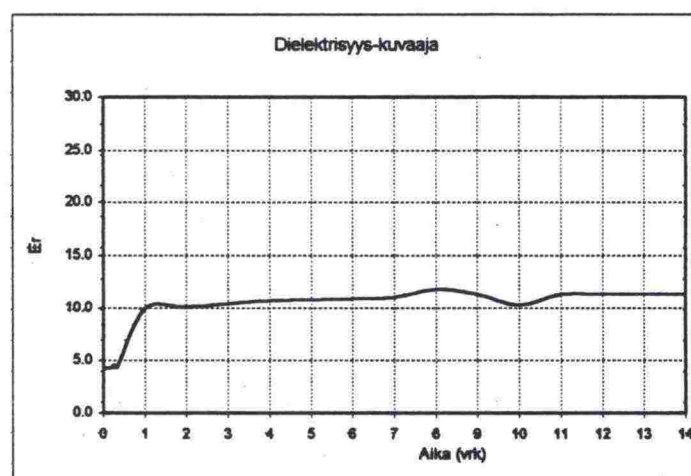
Aika	Er	Leikkauspisteet
0	3.1	
0,5 h	3.1	y   4.8
2 h	3.0	x   2.4
4 h	3.1	kulma   35.3
6 h	2.5	
8 h	2.5	Er (9)
1	4.2	
2	4.7	Huomautuksia
3	4.6	
4	4.4	# 0.074 mm 4.00%
5	4.7	ved. ads. 1.35
6	5.2	w-% (5cm) 3.07%
7	5.6	w-% 3.26%
8	5.2	
9	5.6	
10	4.8	
11	4.8	
12	4.8	
13	4.8	
14	4.8	

## Vuontisrova, 3 4,0



Aika	Er	Leikkauspisteet
0	4.3	
0,5 h	4.3	y   11.3
2 h	4.3	x   1.1
4 h	4.3	kulma   81.1
6 h	4.6	
8 h	4.4	Er (9)   0.9
1	10.0	
2	10.1	Huomautuksia
3	10.4	
4	10.7	# 0.074 mm 7.10%
5	10.8	ved. ads. 1.35
6	10.9	w-% (5cm) 3.29%
7	11.0	w-% 4.01%
8	11.8	
9	11.3	
10	10.3	
11	11.3	
12	11.3	
13	11.3	
14	11.3	

## Vuontisrova, 3 7,1



Aika	Er
0	2.9
0,5 h	2.9
2 h	2.8
4 h	2.9
6 h	2.8
8 h	3.0
1	4.4
2	5.0
3	5.2
4	5.2
5	5.3
6	5.4
7	5.4
8	5.0
9	4.8
10	4.1
11	4.9
12	4.9
13	4.9
14	4.9

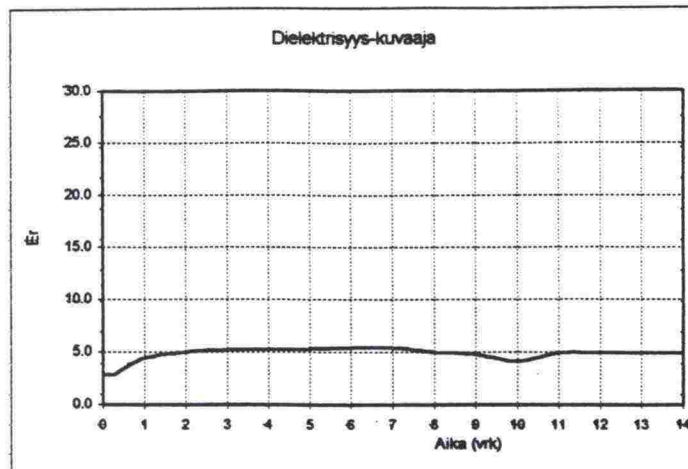
Leikkauspisteet  
 $y = 4.9$   
 $x = 1.8$

kulma  $\boxed{48.0}$

Er (9)  $\boxed{\phantom{00}}$

Huomautuksia  
 # 0.074 mm 3.60%  
 ved. ads. 2.15  
 w-% (5cm) 3.00%  
 w-% 4.32%

## Palovaara, 4 3,6



Aika	Er
0	3.6
0,5 h	3.6
2 h	3.6
4 h	3.4
6 h	3.7
8 h	4.0
1	8.0
2	7.4
3	7.7
4	7.3
5	7.3
6	7.4
7	7.4
8	8.5
9	7.8
10	7.3
11	8.2
12	8.2
13	8.2
14	8.2

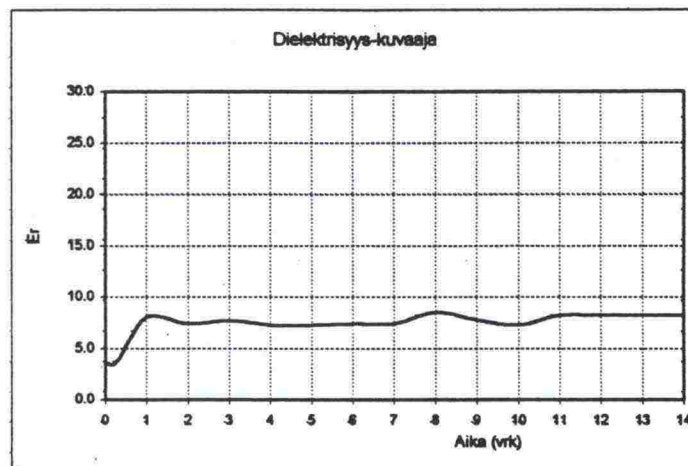
Leikkauspisteet  
 $y = 8.2$   
 $x = 1.0$

kulma  $\boxed{77.7}$

Er (9)  $\boxed{\phantom{00}}$

Huomautuksia  
 # 0.074 mm 5.20%  
 ved. ads. 2.15  
 w-% (5cm) 4.15%  
 w-% 5.20%

## Palovaara, 4 5,2



Aika	Er
0	4.4
0,5 h	4.3
2 h	4.4
4 h	4.5
6 h	4.2
8 h	4.7
1	10.6
2	10.3
3	10.9
4	10.7
5	10.7
6	10.7
7	10.7
8	11.6
9	11.9
10	11.2
11	11.2
12	11.2
13	11.2
14	11.2

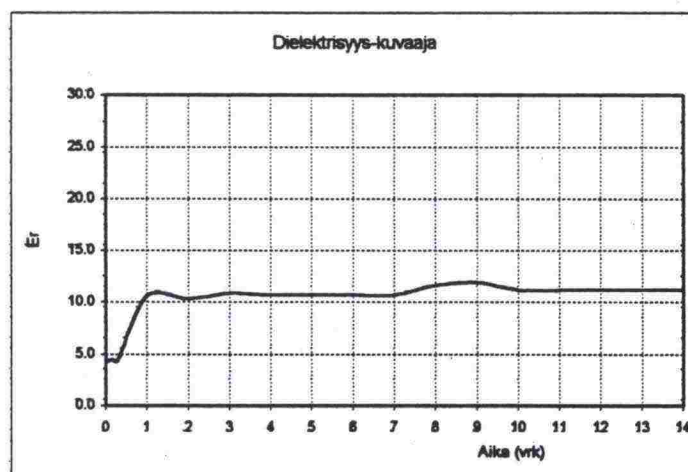
Leikkauspisteet  
 $y = 11.2$   
 $x = 1.1$

kulma  $\boxed{80.8}$

Er (9)  $\boxed{0.8}$

Huomautuksia  
 # 0.074 mm 5.70%  
 ved. ads. 2.15  
 w-% (5cm) 4.25%  
 w-% 5.17%

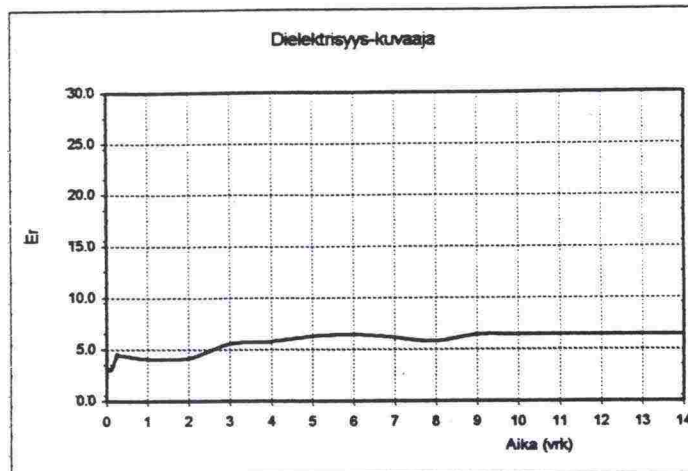
## Palovaara, 4 5,7





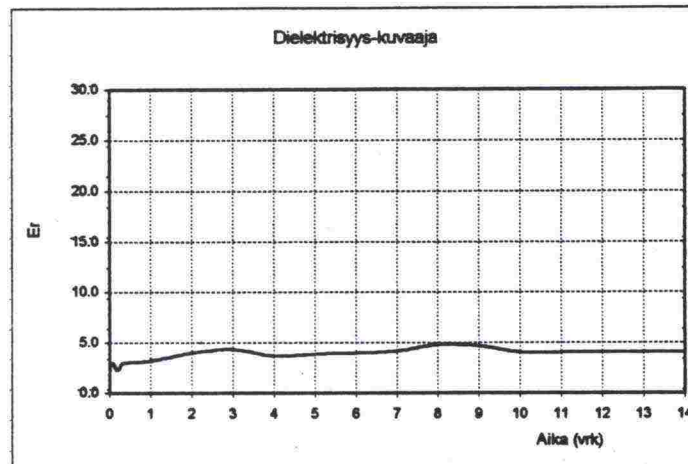
## Peurakallio, 5 1,9

Aika	Er	Leikkauspisteet
0	2.8	
0,5 h	3.2	$\frac{y}{x} = \frac{6.4}{0.6}$
2 h	3.0	
4 h	3.6	
6 h	4.6	
8 h	4.5	kulma 80.5
1	4.1	
2	4.2	Er (9)
3	5.6	
4	5.8	Huomautuksia
5	6.3	# 0.074 mm 1.90%
6	6.5	ved. ads. 3.12
7	6.2	w-% (5cm) 1.58%
8	5.8	w-% 2.75%
9	6.4	
10	6.4	
11	6.4	
12	6.4	
13	6.4	
14	6.4	



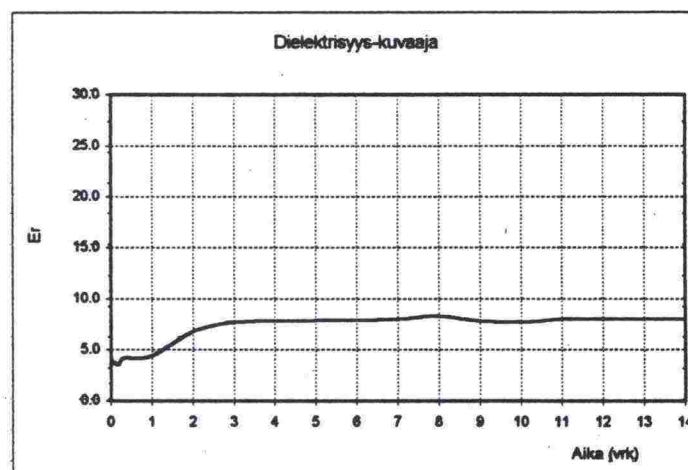
## Peurakallio, 5 4,1

Aika	Er	Leikkauspisteet
0	3.0	
0,5 h	2.9	$\frac{y}{x} = \frac{4.1}{2.5}$
2 h	3.0	
4 h	2.3	
6 h	2.6	
8 h	3.0	kulma 23.7
1	3.2	
2	4.0	Er (9)
3	4.4	
4	3.7	Huomautuksia
5	3.9	# 0.074 mm 4.10%
6	4.0	ved. ads. 3.12
7	4.2	w-% (5cm) 3.06%
8	4.8	w-% 4.24%
9	4.7	
10	4.1	
11	4.1	
12	4.1	
13	4.1	
14	4.1	



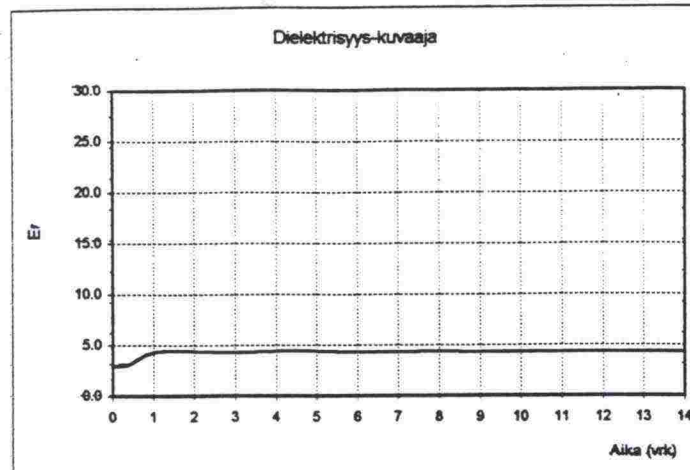
## Peurakallio, 5 4,9

Aika	Er	Leikkauspisteet
0	4.2	
0,5 h	3.8	$\frac{y}{x} = \frac{8.0}{3.0}$
2 h	3.8	
4 h	3.5	
6 h	4.1	
8 h	4.2	kulma 51.7
1	4.4	
2	6.8	Er (9)
3	7.7	
4	7.8	Huomautuksia
5	7.9	# 0.074 mm 4.90%
6	7.9	ved. ads. 3.12
7	8.0	w-% (5cm) 3.02%
8	8.3	w-% 3.81%
9	7.8	
10	7.7	
11	8.0	
12	8.0	
13	8.0	
14	8.0	



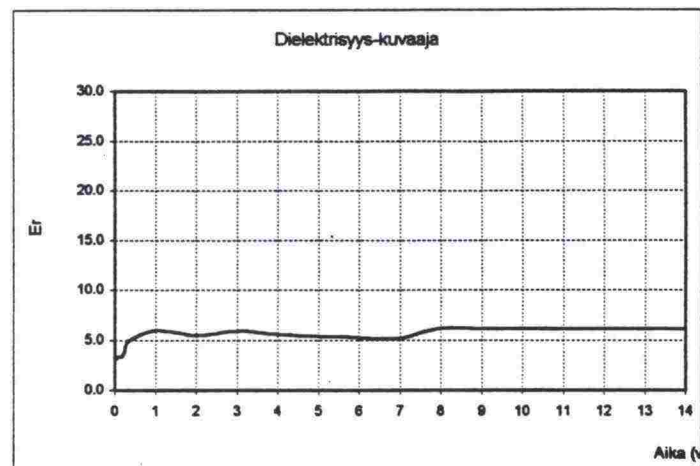
## Tohmoaara, 6 3,2

Aika	Er	Leikkauspisteet
0	2.8	
0,5 h	3.0	y   4.3
2 h	3.0	x   1.1
4 h	2.9	
6 h	3.1	
8 h	3.0	kulma   53.7
1	4.3	
2	4.4	Er (9)
3	4.3	
4	4.4	Huomautuksia
5	4.4	# 0.074 mm 3.20%
6	4.3	ved. ads. 0.81
7	4.3	w-% (5cm) 3.26%
8	4.3	w-% 3.75%
9	4.4	
10	4.3	
11	4.3	
12	4.3	
13	4.3	
14	4.3	



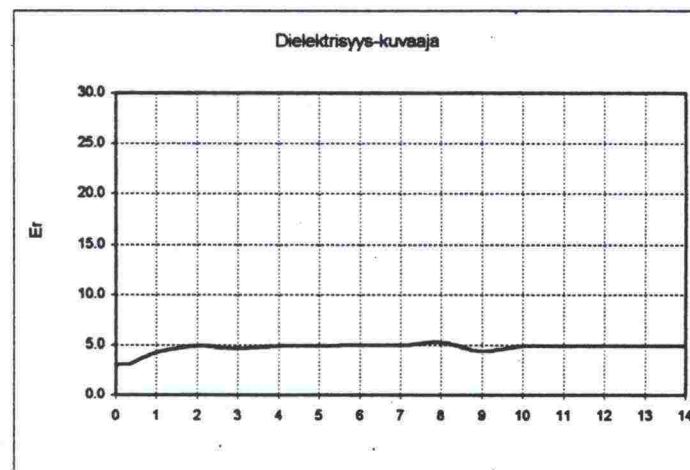
## Tohmoaara, 6 3,8

Aika	Er	
0	3.5	Leikkauspisteet
0,5 h	3.1	$\begin{array}{r l} y & 6.1 \\ \hline x & 1.0 \end{array}$
2 h	3.4	
4 h	3.4	
6 h	4.1	
8 h	4.9	kulma $\begin{array}{r l} & 69.0 \\ \hline \end{array}$
1	6.0	
2	5.5	Er (9) $\begin{array}{r l} & \\ \hline \end{array}$
3	5.9	Huomautuksia
4	5.6	# 0.074 mm 3.80%
5	5.4	ved. ads. 0.81
6	5.3	w-% (5cm) 3.23%
7	5.2	w-% 5.01%
8	6.2	
9	6.1	
10	6.1	
11	6.1	
12	6.1	
13	6.1	
14	6.1	



## Tohmoaara, 6 4,8

Aika	Er	
0	2.6	Leikkauspisteet
0,5 h	3.1	$\frac{y}{x} \quad \frac{4.9}{1.8}$
2 h	3.1	
4 h	3.1	
6 h	3.1	
8 h	3.1	kulma $\frac{\quad}{\quad} \quad 52.0$
1	4.3	Er (9) $\frac{\quad}{\quad}$
2	4.9	
3	4.7	Huomautuksia
4	4.9	# 0.074 mm 4.80%
5	4.9	ved. ads. 0.81
6	5.0	w-% (5cm) 4.06%
7	5.0	w-% 4.68%
8	5.3	
9	4.4	
10	4.9	
11	4.9	
12	4.9	
13	4.9	
14	4.9	



Aika	Er
0	3.6
0,5 h	3.8
2 h	3.8
4 h	6.8
6 h	12.6
8 h	11.6
1	11.6
2	12.5
3	12.7
4	12.0
5	12.8
6	13.5
7	14.2
8	12.2
9	11.6
10	13.2
11	13.2
12	13.2
13	13.2
14	13.2

Leikkauspisteet

y	13.2
x	0.3

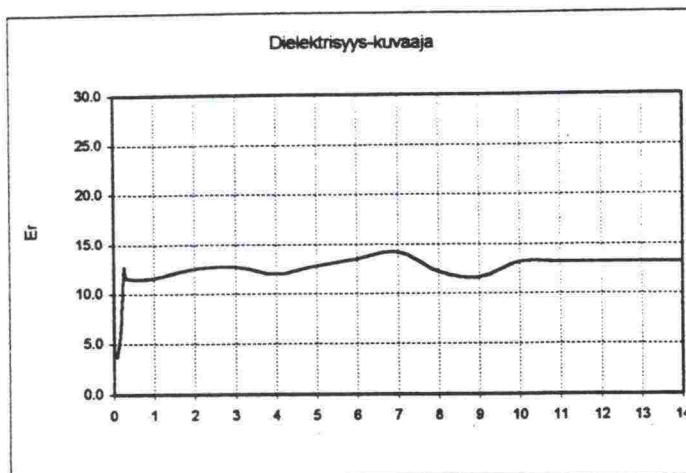
kulma 88.2

Er (9) 0.2

Huomautuksia

# 0.074 mm 3.80%  
ved. ads. 1.83  
w-% (5cm) 4.52%  
w-% 4.81%

## Lampeltmossen, 7 3,8



Aika	Er
0	4.1
0,5 h	4.1
2 h	4.3
4 h	4.2
6 h	4.7
8 h	7.8
1	17.4
2	20.0
3	19.8
4	17.3
5	18.0
6	19.5
7	20.3
8	20.3
9	21.0
10	20.2
11	20.2
12	20.2
13	20.2
14	20.2

Leikkauspisteet

y	20.2
x	2.3

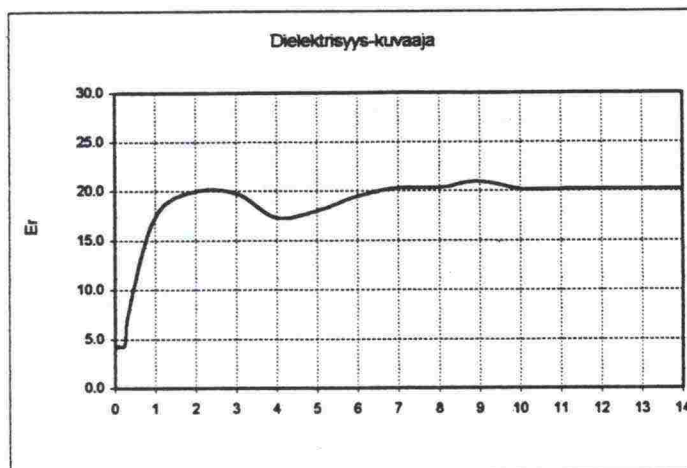
kulma 81.9

Er (9) 0.4

Huomautuksia

# 0.074 mm 5.90%  
ved. ads. 1.83  
w-% (5cm) 4.97%  
w-% 5.61%

## Lampeltmossen, 7 5,9



Aika	Er
0	4.2
0,5 h	4.2
2 h	4.2
4 h	4.2
6 h	4.6
8 h	6.8
1	20.6
2	23.0
3	23.0
4	21.7
5	22.3
6	22.9
7	23.6
8	23.6
9	24.1
10	23.8
11	23.8
12	23.8
13	23.8
14	23.8

Leikkauspisteet

y	23.8
x	2.3

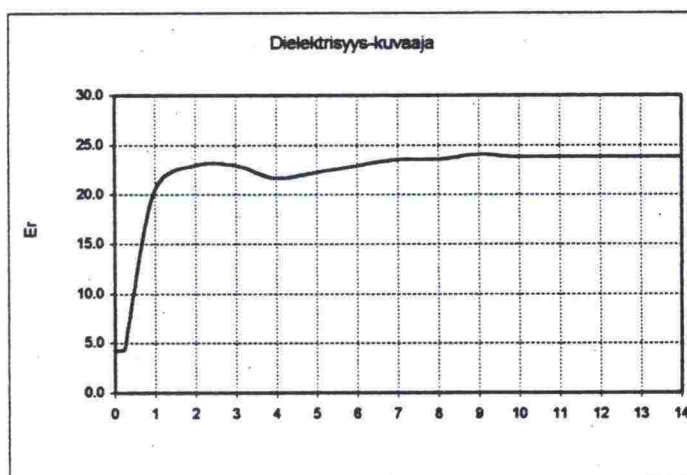
kulma 83.3

Er (9) 0.4

Huomautuksia

# 0.074 mm 6.10%  
ved. ads. 1.83  
w-% (5cm) 5.08%  
w-% 5.61%

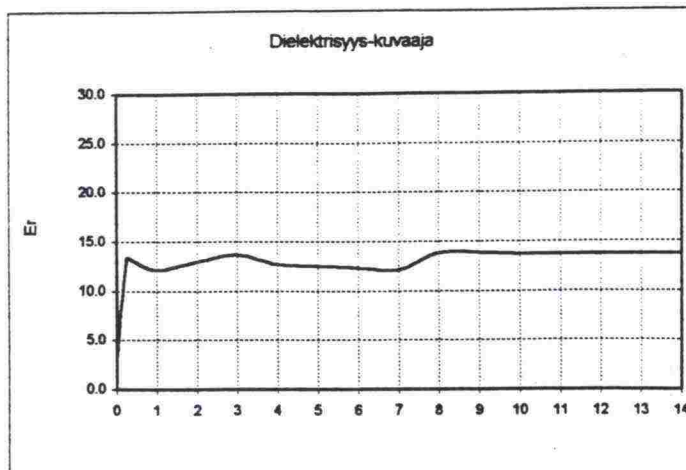
## Lampeltmossen, 7 6,1





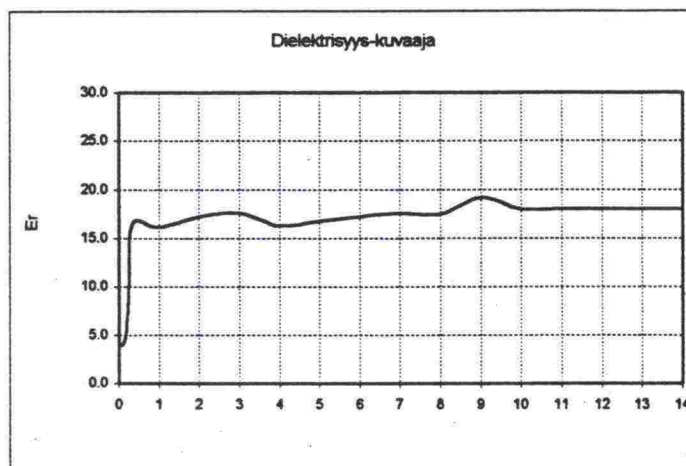
## Vuorenmaa, 8 3,5

Aika	Er	Leikkauspisteet
0	3.4	
0,5 h	3.6	
2 h	7.0	y 13.7
4 h	10.7	x 0.3
6 h	13.4	kulma 88.3
8 h	13.3	
1	12.1	Er (9) 0.1
2	13.0	
3	13.7	Huomautuksia # 0.074 mm 3.50% ved. ads. 2.39 w-% (5cm) 4.29% w-% 4.80%
4	12.7	
5	12.5	
6	12.3	
7	12.1	
8	13.8	
9	13.9	
10	13.7	
11	13.7	
12	13.7	
13	13.7	
14	13.7	



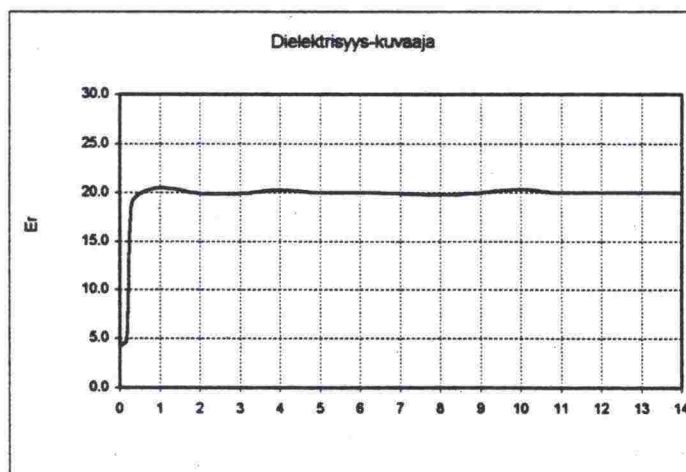
## Vuorenmaa, 8 5,7

Aika	Er	Leikkauspisteet
0	3.8	
0,5 h	4.0	
2 h	4.0	y 18.0
4 h	5.2	x 0.3
6 h	10.6	kulma 88.8
8 h	16.6	
1	16.2	Er (9) 0.2
2	17.2	
3	17.6	Huomautuksia # 0.074 mm 5.70% ved. ads. 2.39 w-% (5cm) 5.61% w-% 6.11%
4	16.3	
5	16.8	
6	17.2	
7	17.6	
8	17.5	
9	19.2	
10	18.0	
11	18.0	
12	18.0	
13	18.0	
14	18.0	



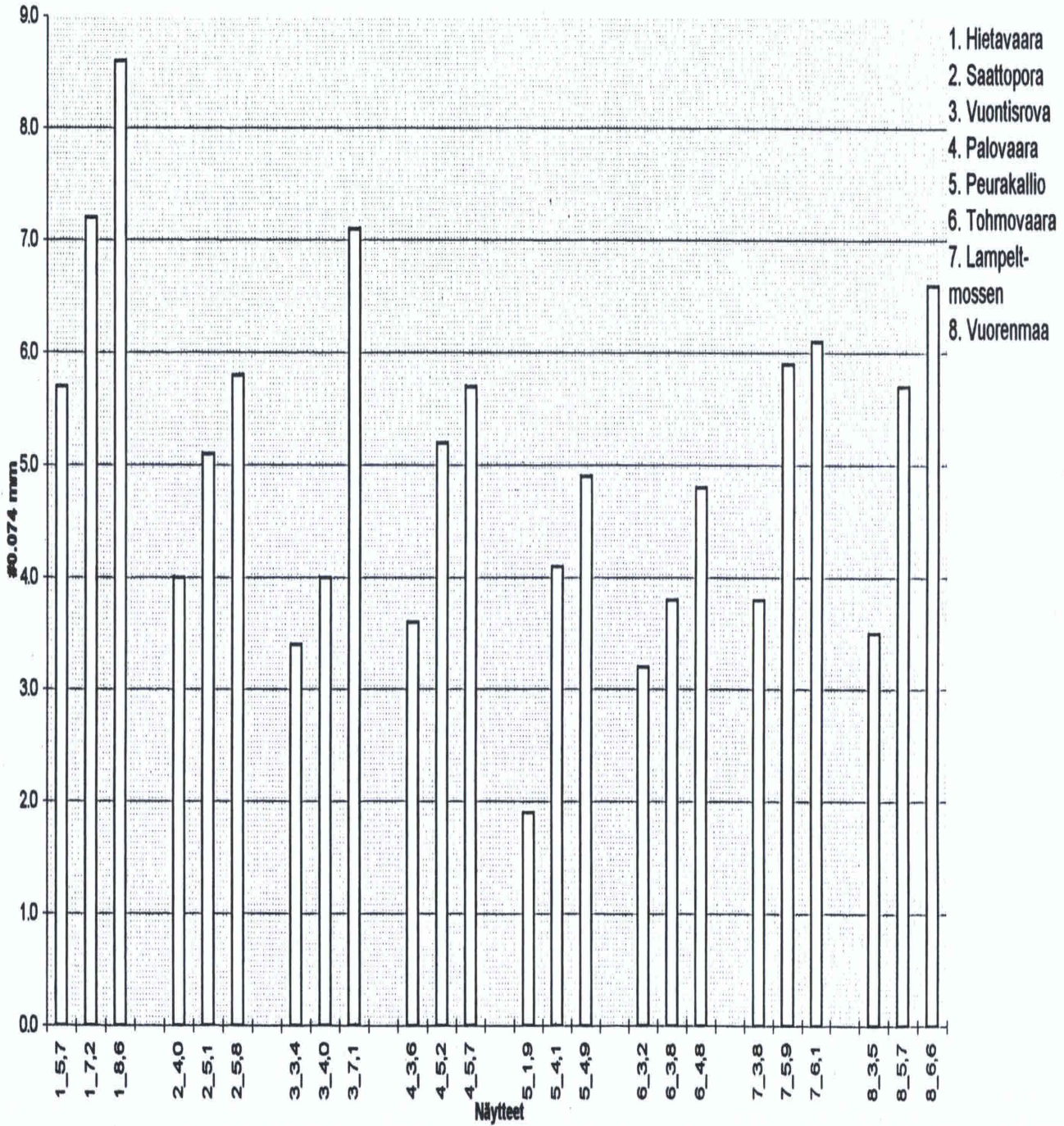
## Vuorenmaa, 8 6,6

Aika	Er	Leikkauspisteet
0	4.1	
0,5 h	4.3	
2 h	4.4	y 20.0
4 h	4.9	x 0.7
6 h	16.8	kulma 87.5
8 h	19.3	
1	20.5	Er (9) 0.2
2	19.9	
3	19.9	Huomautuksia # 0.074 mm 6.60% ved. ads. 2.39 w-% (5cm) 5.63% w-% 6.35%
4	20.3	
5	20.0	
6	20.0	
7	19.9	
8	19.8	
9	20.0	
10	20.4	
11	20.0	
12	20.0	
13	20.0	
14	20.0	



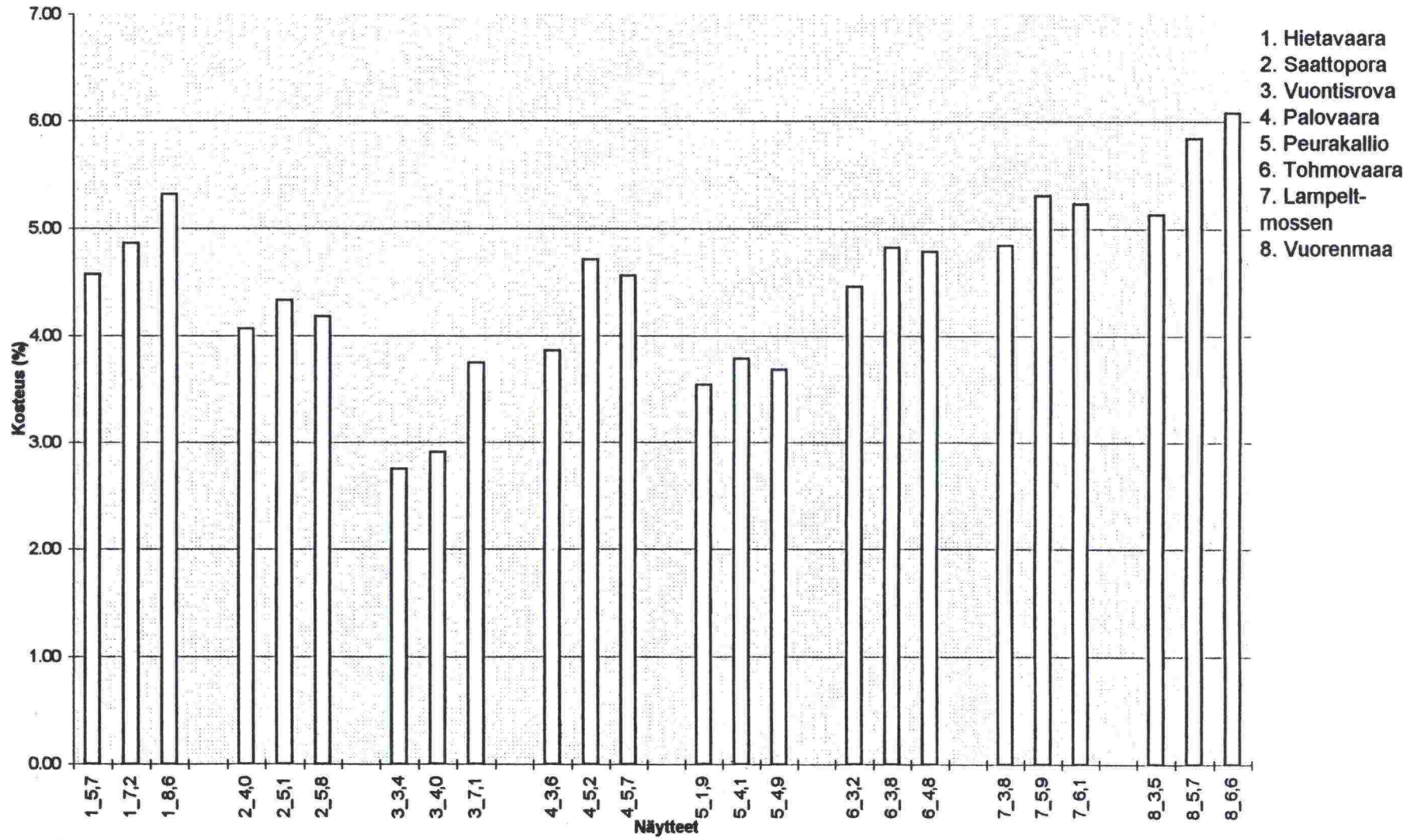
	Paino ennen TS-testiä	Paino TS-testin jälkeen	Muutos (g)	Kosteus (%)	Pinta- kosteus (5cm)	Kulvaihto- tiheys	Kilinto- tiheys	Huokos- luku	Dielektrisyys Er(max) Er(min)	Sähkönjohtavuus min max	#0.074mm
1_5,7	7478	7820	342	4.57	4.16	2.14	2.71	0.27	10.10 3.3	0 60	5.7
1_7,2	7571	7939	368	4.86	4.34	2.18	2.70	0.24	13.40 3.8	0 95	7.2
1_8,6	7678	8086	408	5.31	4.68	2.20	2.72	0.24	14.40 3.9	0 147	8.6
2_4,0	7580	7888	308	4.06	2.53	2.15	2.81	0.31	6.80 2.7	0 15	4
2_5,1	7778	8115	337	4.33	3.63	2.21	2.84	0.28	11.20 4.5	0 65	5.1
2_5,8	7756	8080	324	4.18	3.59	2.25	2.85	0.26	11.30 4.4	0 56	5.8
3_3,4	7149	7348	197	2.76	2.53	2.07	3.02	0.46	6.80 3.5	0 19	3.4
3_4,0	7146	7354	208	2.91	3.07	2.05	3.00	0.47	5.60 2.5	0 28	4
3_7,1	7574	7858	284	3.75	3.29	2.25	3.00	0.33	11.80 4.3	0 122	7.1
4_3,6	7350	7634	284	3.86	3.00	2.10	2.80	0.33	5.40 2.8	0 10	3.6
4_5,2	7644	8004	360	4.71	4.15	2.19	2.78	0.27	8.50 3.4	0 40	5.2
4_5,7	7727	8079	352	4.56	4.25	2.24	2.80	0.25	11.90 4.2	0 65	5.7
5_1,9	7064	7314	250	3.54	1.58	2.07	2.94	0.47	6.50 2.8	0 26	1.9
5_4,1	7364	7643	279	3.79	3.06	2.09	2.94	0.41	4.80 2.3	0 6	4.1
5_4,9	7600	7880	280	3.68	3.02	2.19	2.93	0.34	8.30 3.5	0 4	4.9
6_3,2	6636	6932	296	4.46	3.26	1.90	2.65	0.39	4.40 2.8	0 4	3.2
6_3,8	7090	7432	342	4.82	3.23	2.00	2.66	0.33	6.20 3.1	0 8	3.8
6_4,8	7108	7448	340	4.78	4.06	2.03	2.66	0.31	5.30 2.6	0 7	4.8
7_3,8	7144	7490	346	4.84	4.52	2.08	2.73	0.31	14.20 3.6	0 269	3.8
7_5,9	7558	7959	401	5.31	4.97	2.19	2.73	0.25	21.00 4.1	0 559	5.9
7_6,1	7650	8050	400	5.23	5.08	2.18	2.75	0.23	24.10 4.2	0 737	6.1
8_3,5	7214	7584	370	5.13	4.29	2.11	2.73	0.29	13.90 3.4	0 196	3.5
8_5,7	7536	7978	440	5.84	5.61	2.17	2.71	0.25	19.20 3.8	0 443	5.7
8_6,6	7578	8039	461	6.08	5.63	2.16	2.75	0.27	20.50 4.1	0 424	6.6

# #0.074 mm läpäisyprosentit

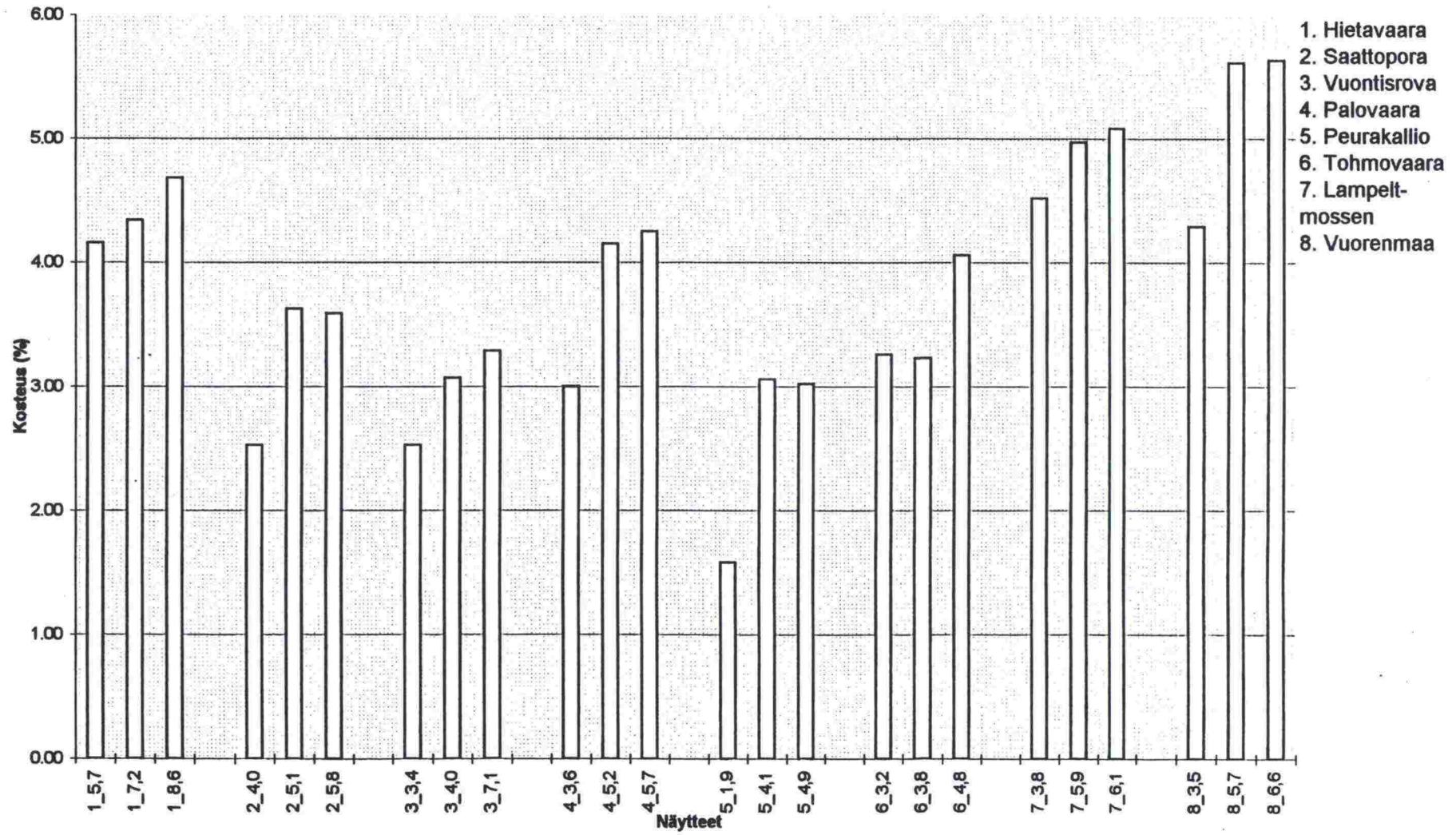




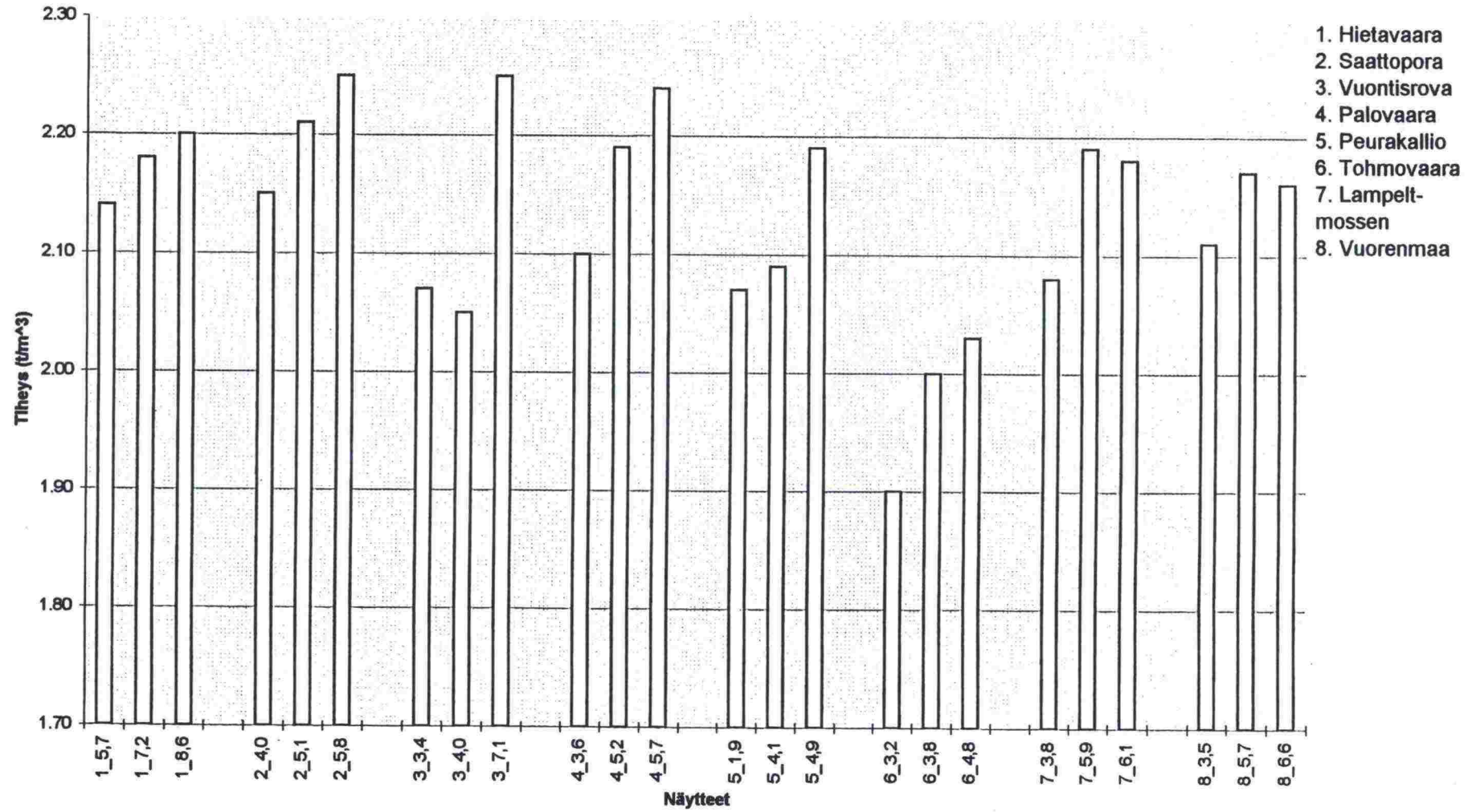
**Näytteiden kosteudet TS-testin jälkeen**



# Näytteiden pintakosteudet (5cm)

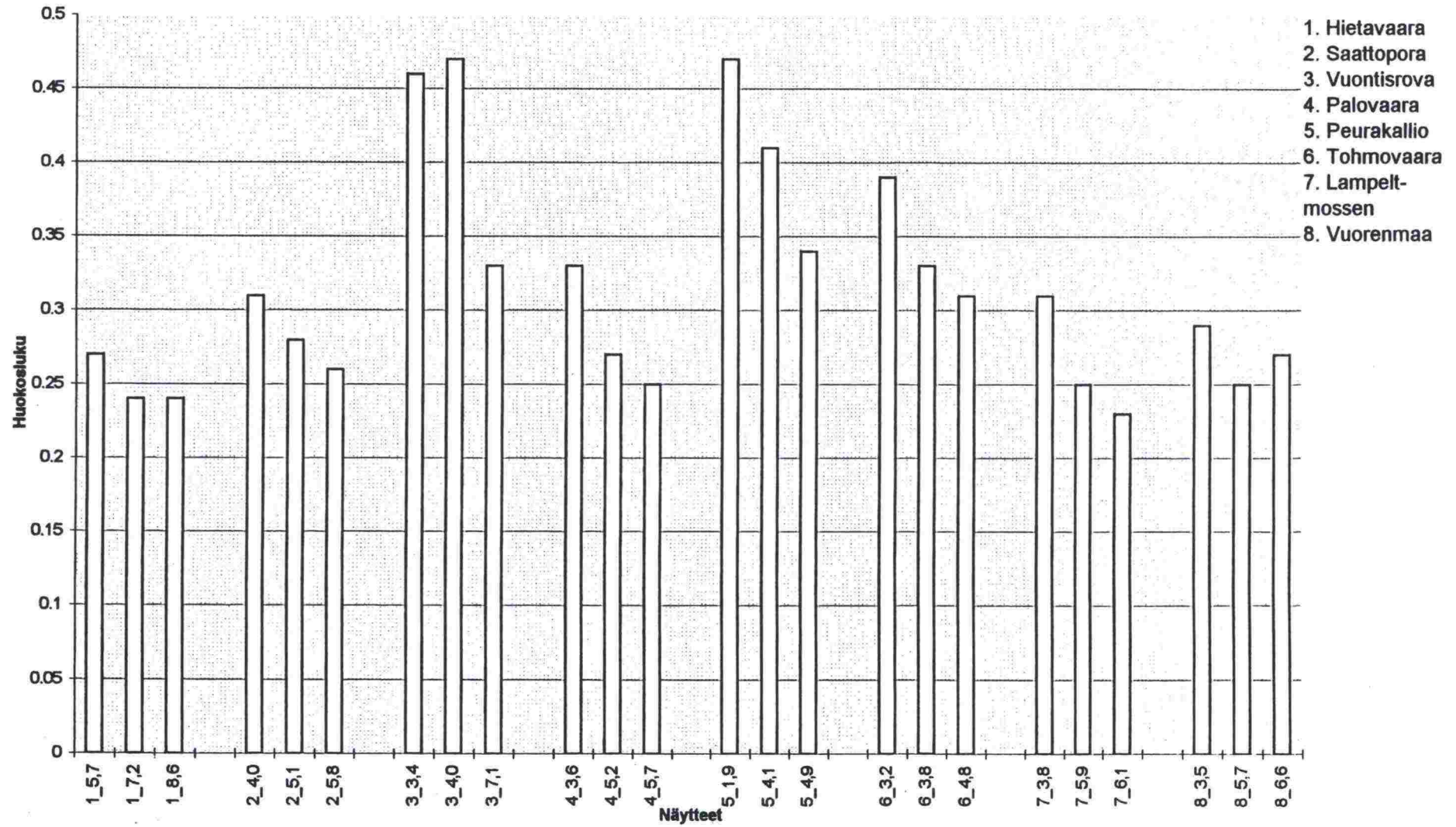


# Näytteiden kuiva-ainepitoisuudet

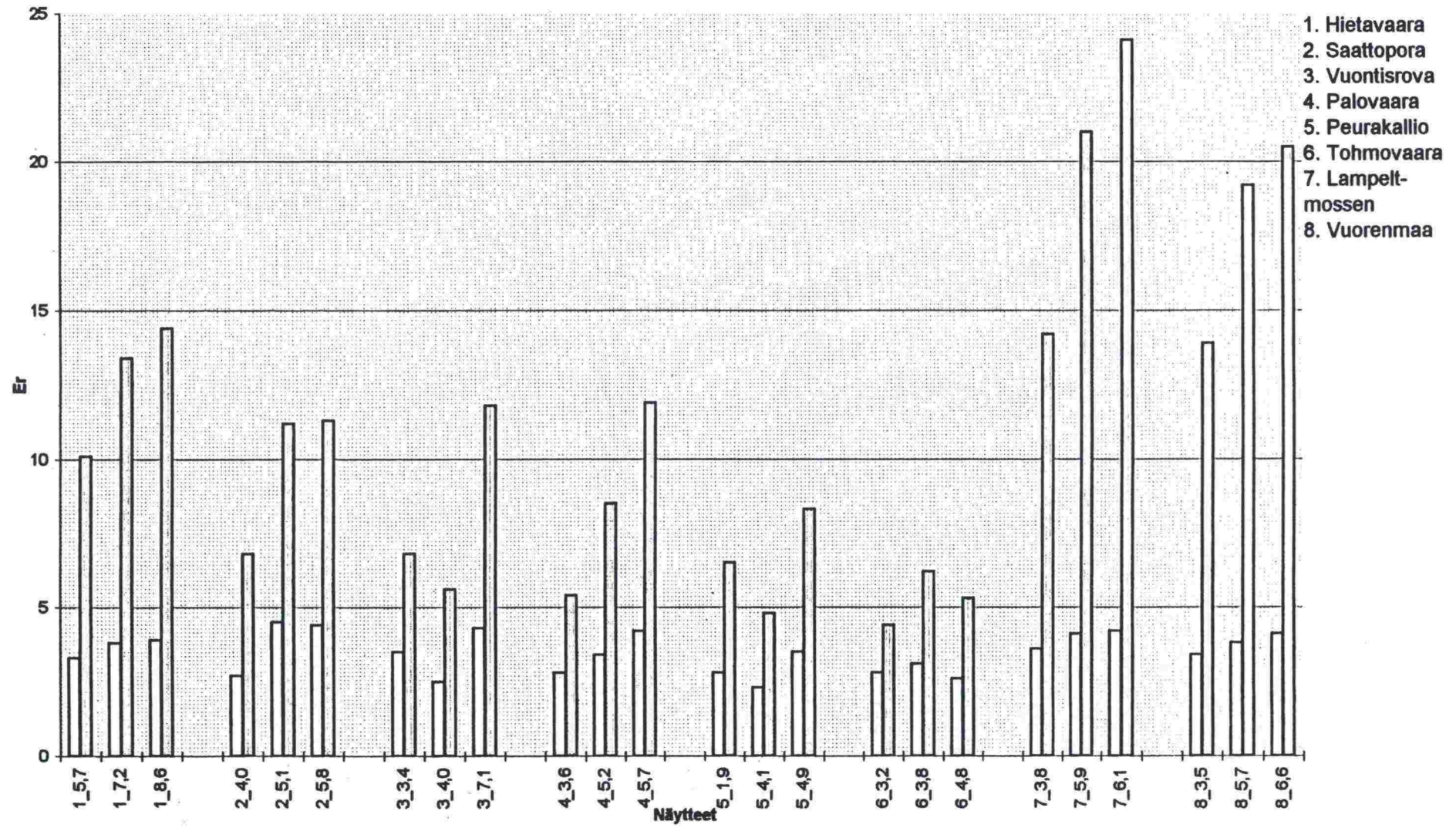




# Näytteiden huokosluvut

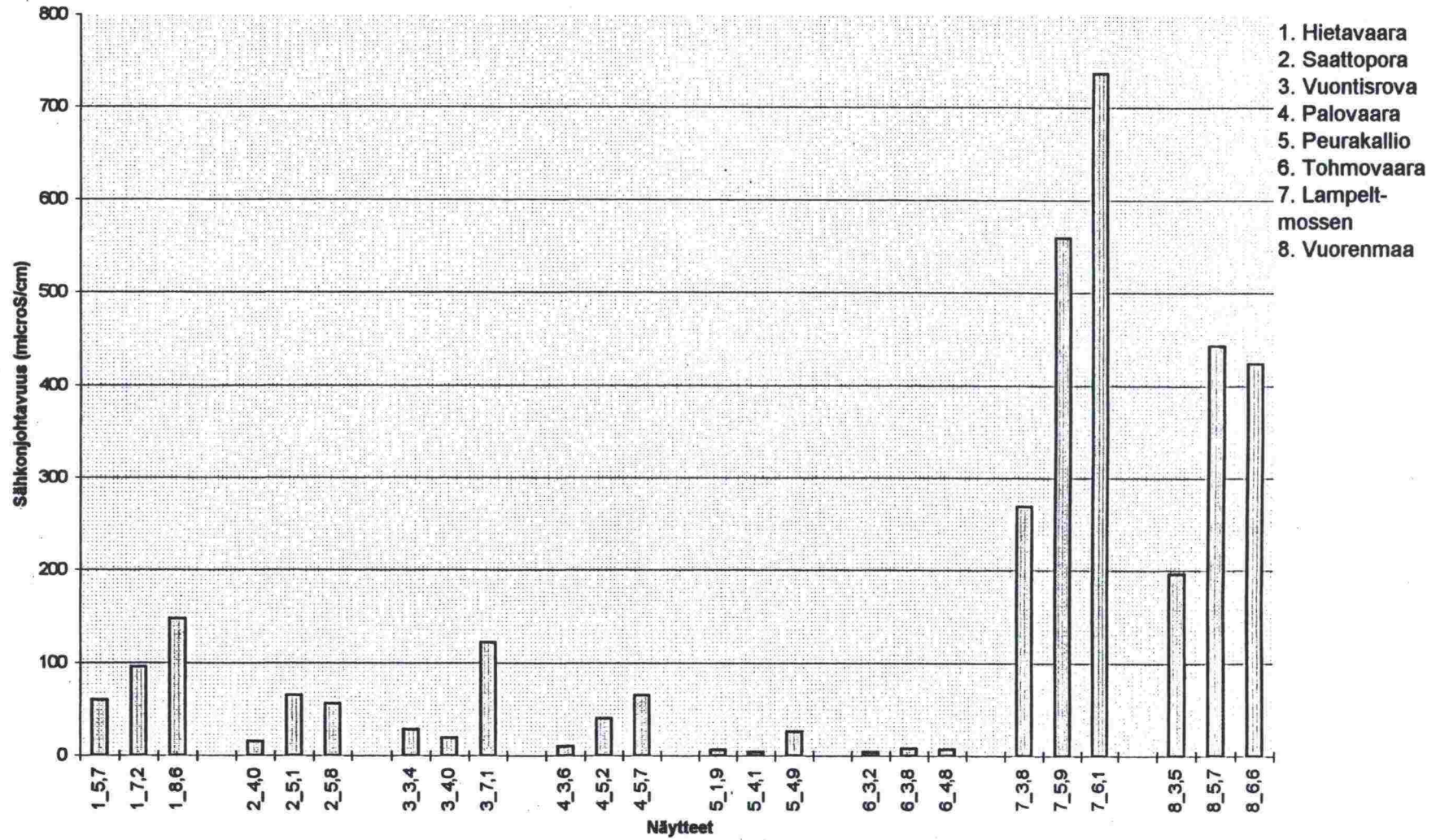


Er max/min



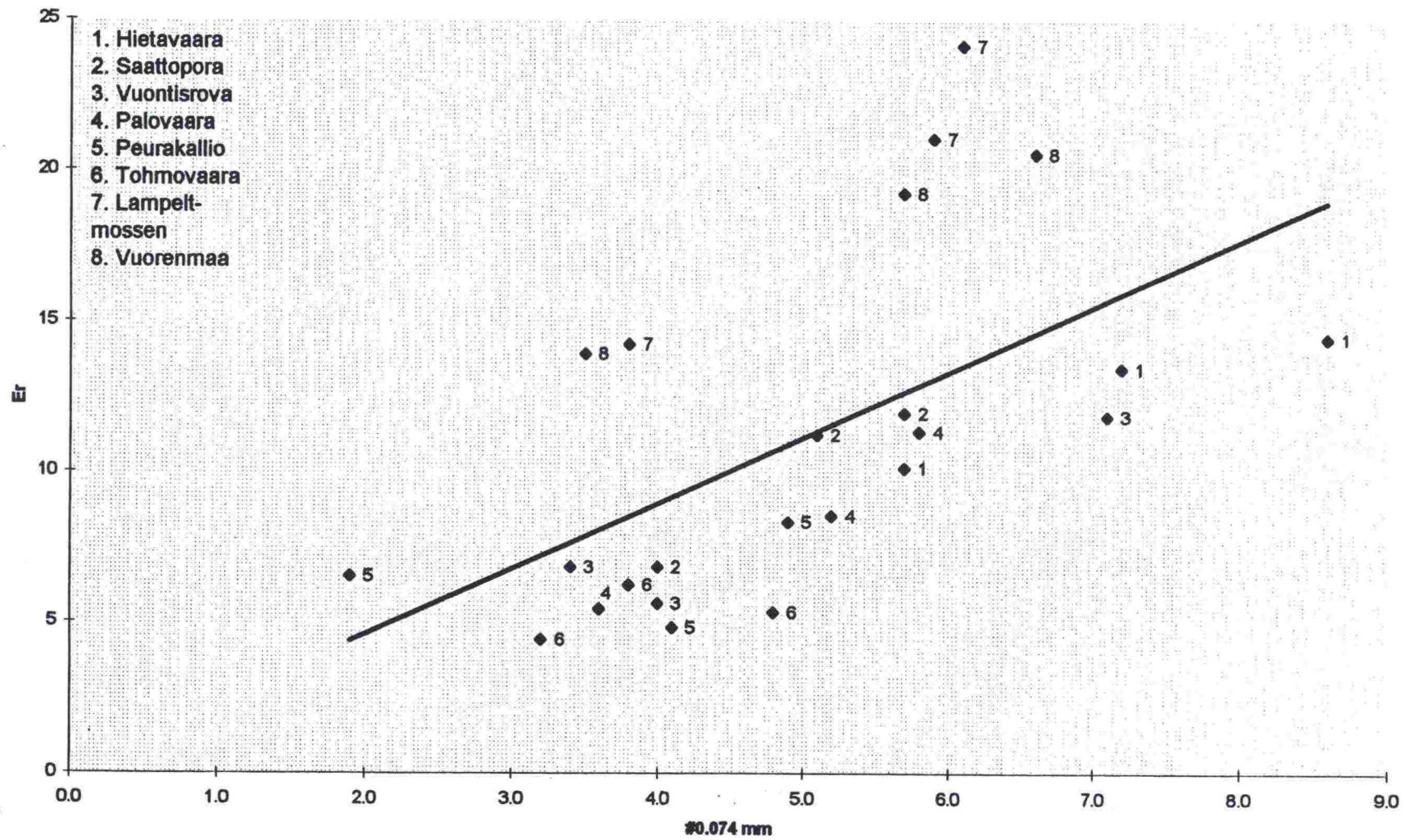


# Näytteliden sähköjohtavuudet

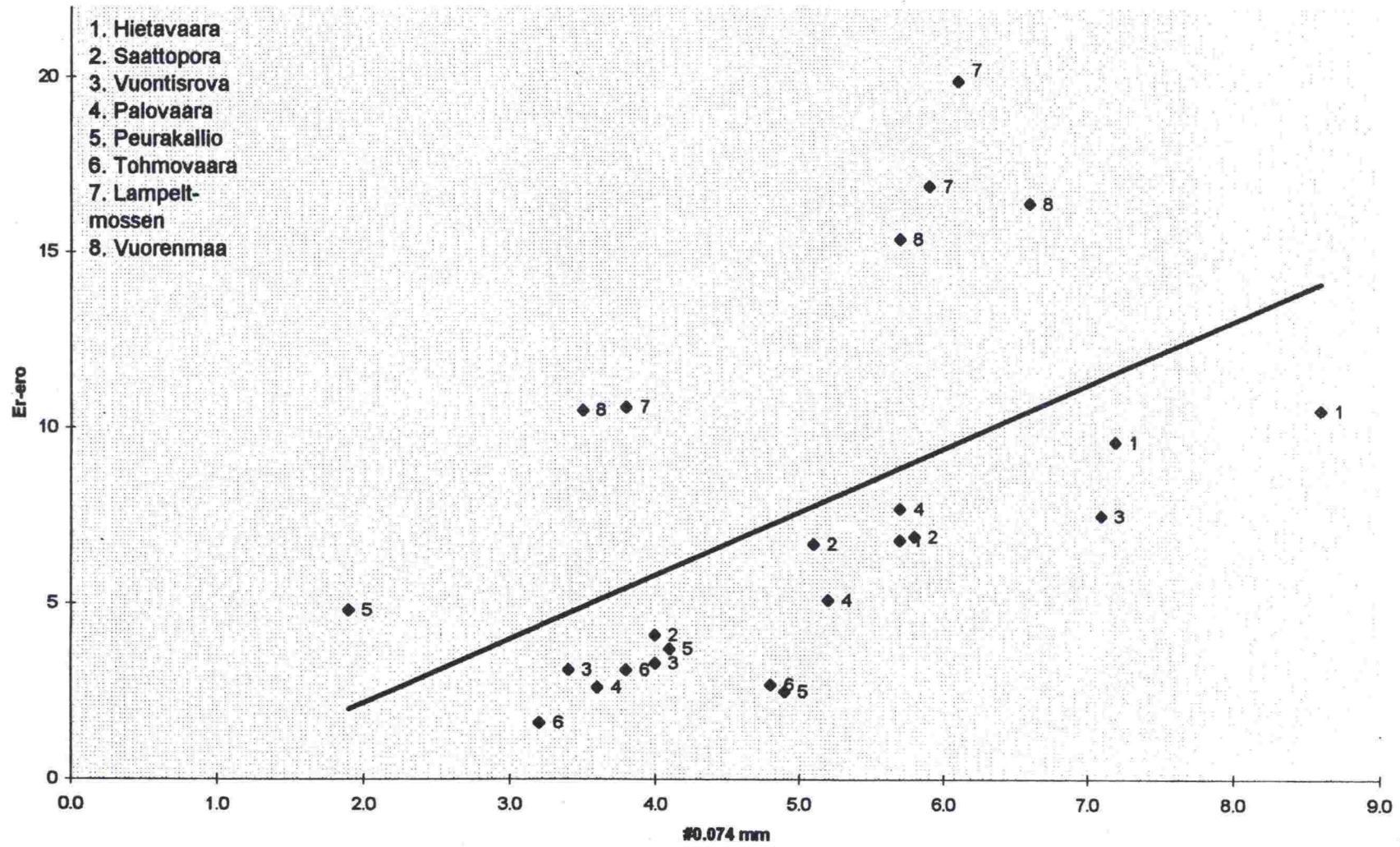




#0.074mm / Er(max)

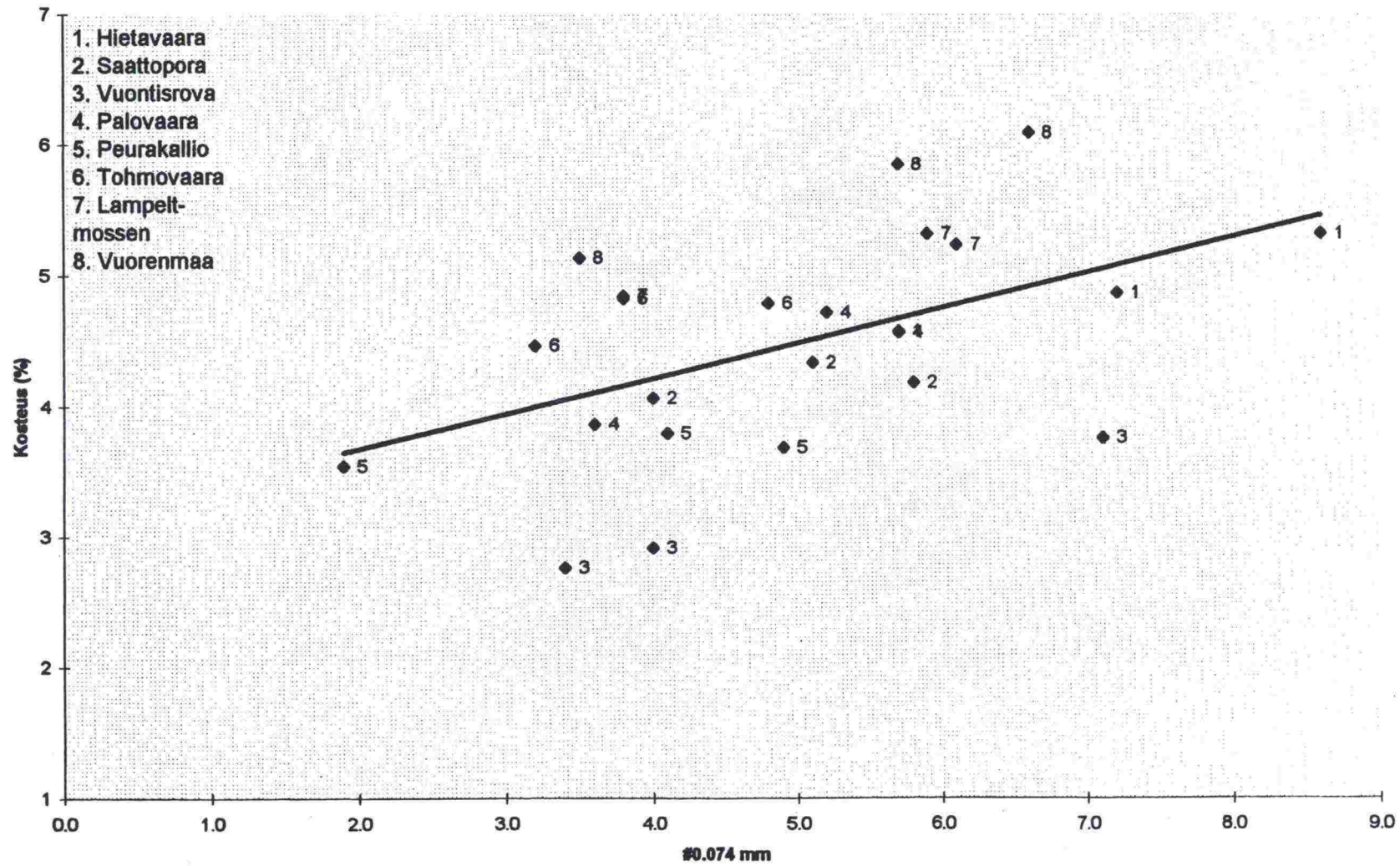


#0.074 mm / Er-erot



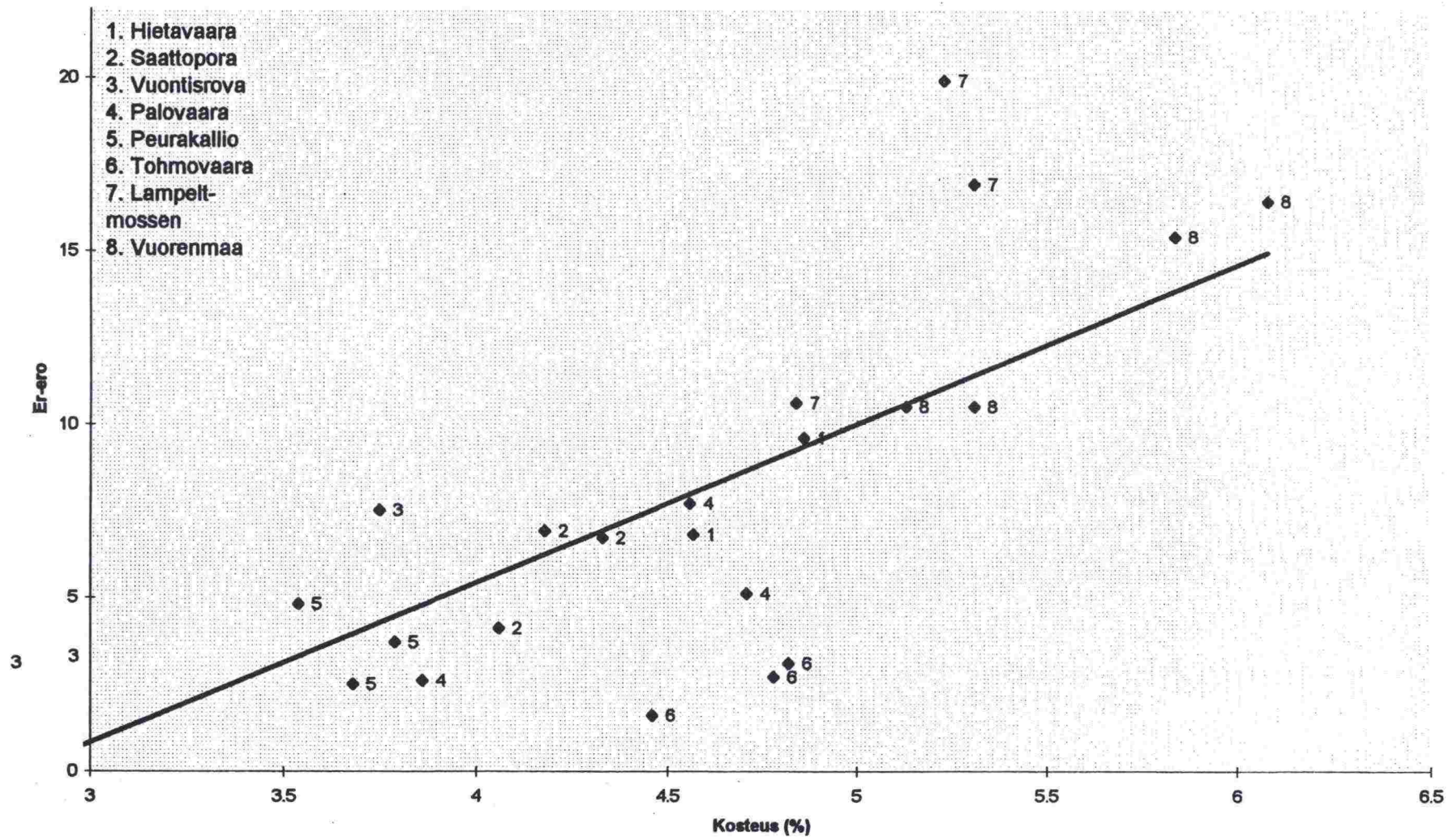


#0.074 mm / Kosteus





# Kosteus / Er-erot

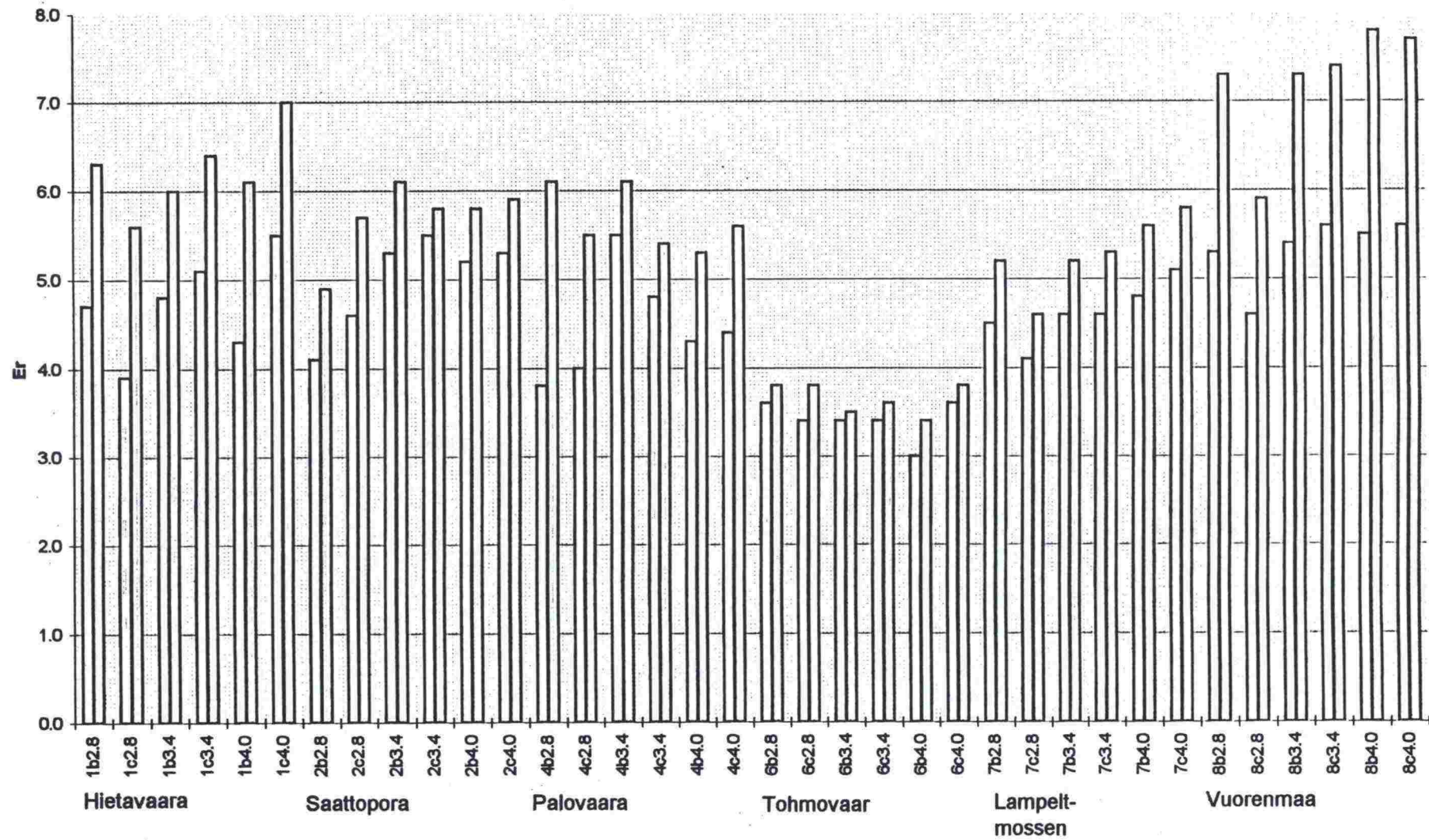


## LIITE 4, (1/6)

	Er min	Er max	Paino min	Paino max	Erotus	Kosteus (%)
1b2.8	4.7	6.3	3824	3877	53	1.39
1c2.8	3.9	5.6	3817	3854	37	0.97
1b3.4	4.8	6.0	3798	3845	47	1.24
1c3.4	5.1	6.4	3806	3842	36	0.95
1b4.0	4.3	6.1	3803	3847	44	1.16
1c4.0	5.5	7.0	3798	3847	49	1.29
2b2.8	4.1	4.9	3792	3829	37	0.98
2c2.8	4.6	5.7	3788	3821	33	0.87
2b3.4	5.3	6.1	3787	3826	39	1.03
2c3.4	5.5	5.8	3792	3823	31	0.82
2b4.0	5.2	5.8	3797	3829	32	0.84
2c4.0	5.3	5.9	3780	3819	39	1.03
4b2.8	3.8	6.1	3868	3986	118	3.05
4c2.8	4.0	5.5	3862	3968	106	2.74
4b3.4	5.5	6.1	3865	3942	77	1.99
4c3.4	4.8	5.4	3876	3960	84	2.17
4b4.0	4.3	5.3	3869	3922	53	1.37
4c4.0	4.4	5.6	3870	3924	54	1.40
6b2.8	3.6	3.8	3459	3529	70	2.02
6c2.8	3.4	3.8	3500	3562	62	1.77
6b3.4	3.4	3.5	3507	3564	57	1.63
6c3.4	3.4	3.6	3496	3539	43	1.23
6b4.0	3.0	3.4	3493	3542	49	1.40
6c4.0	3.6	3.8	3471	3518	47	1.35
7b2.8	4.5	5.2	3787	3828	41	1.08
7c2.8	4.1	4.6	3779	3820	41	1.08
7b3.4	4.6	5.2	3785	3821	36	0.95
7c3.4	4.6	5.3	3786	3817	31	0.82
7b4.0	4.8	5.6	3780	3819	39	1.03
7c4.0	5.1	5.8	3770	3801	31	0.82
8b2.8	5.3	7.3	3808	3856	48	1.26
8c2.8	4.6	5.9	3800	3859	59	1.55
8b3.4	5.4	7.3	3802	3840	38	1.00
8c3.4	5.6	7.4	3794	3828	34	0.90
8b4.0	5.5	7.8	3792	3823	31	0.82
8c4.0	5.6	7.7	3799	3837	38	1.00

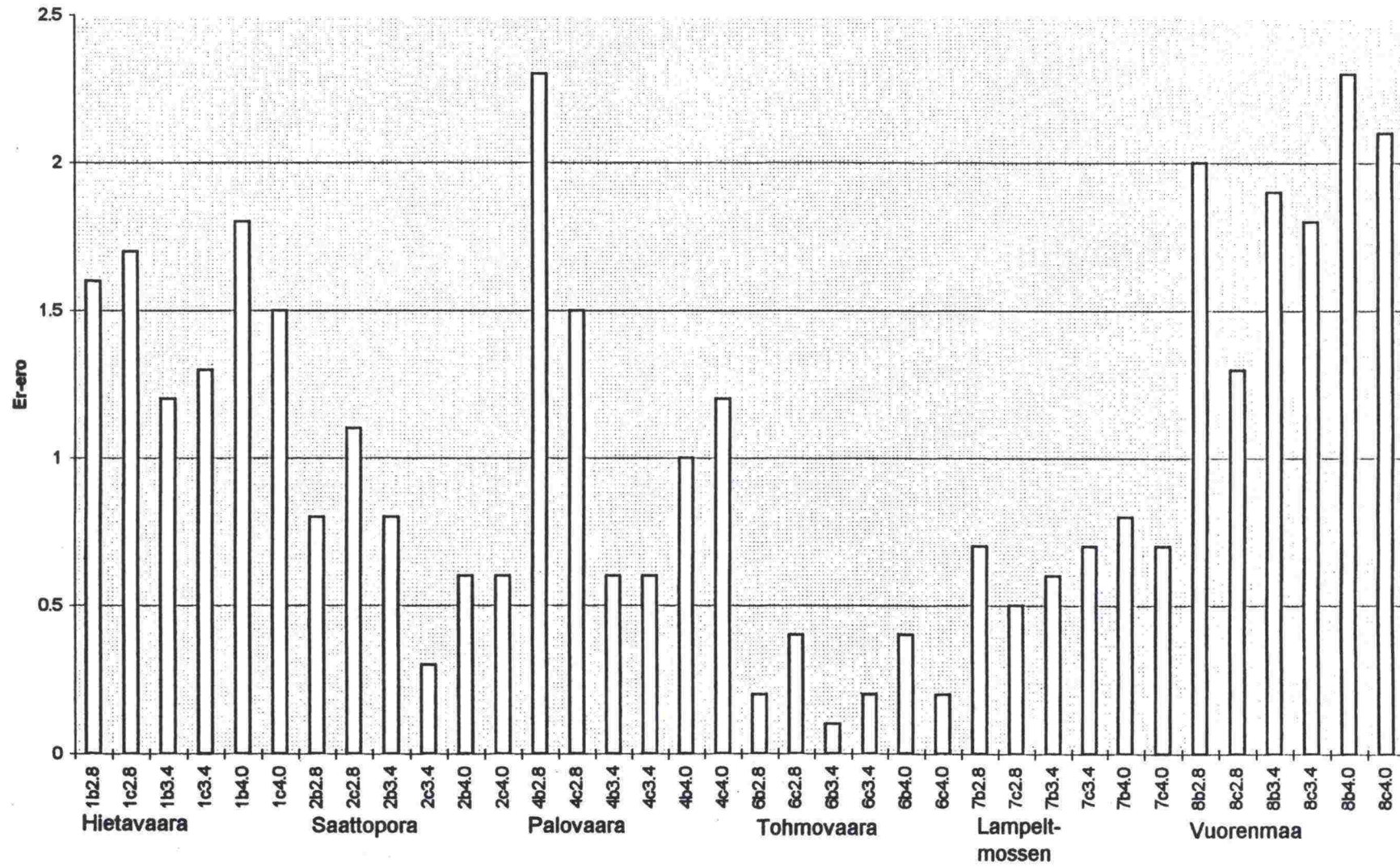


*Er min/max*

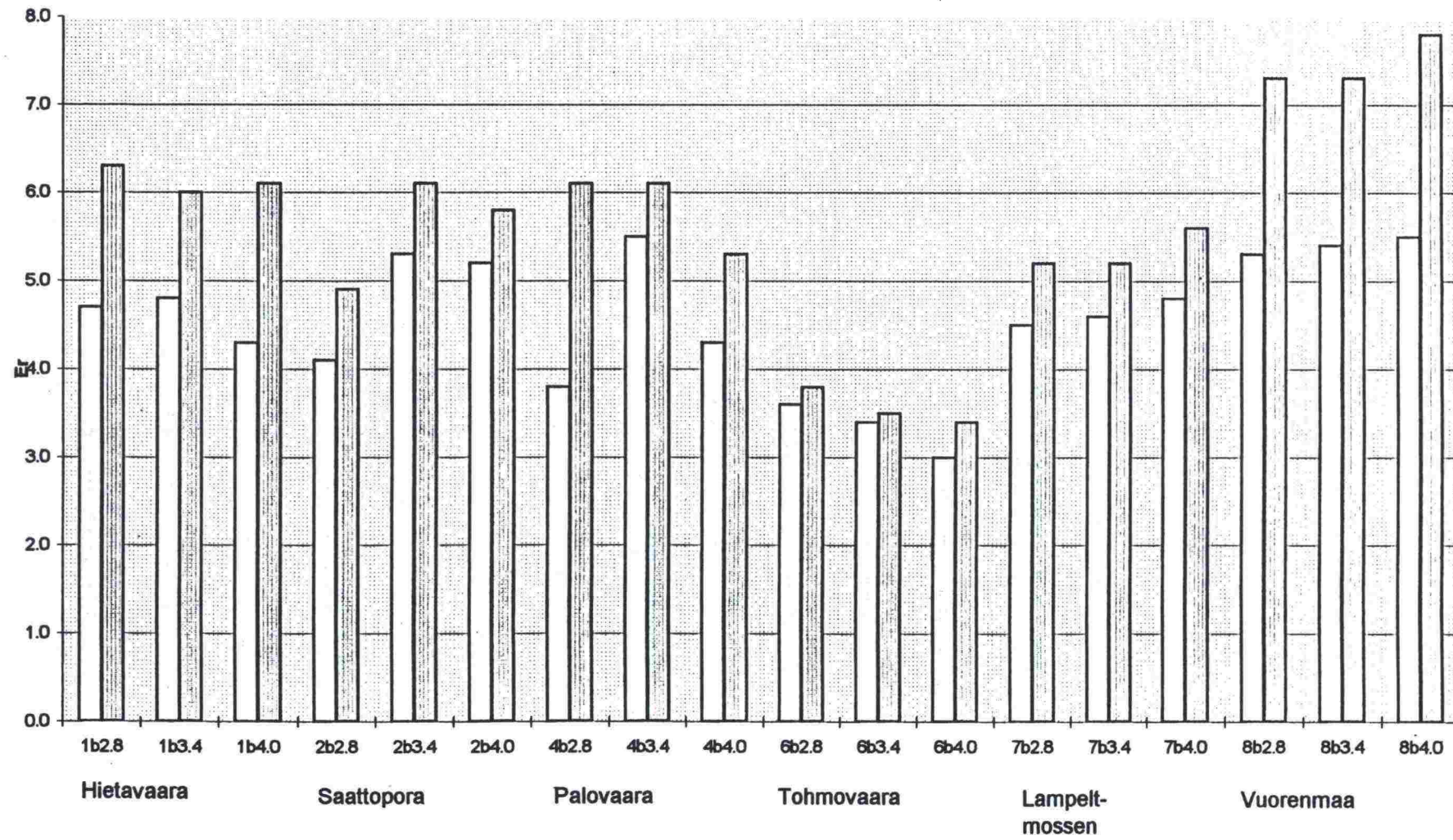




# Näytteliden Er-erot

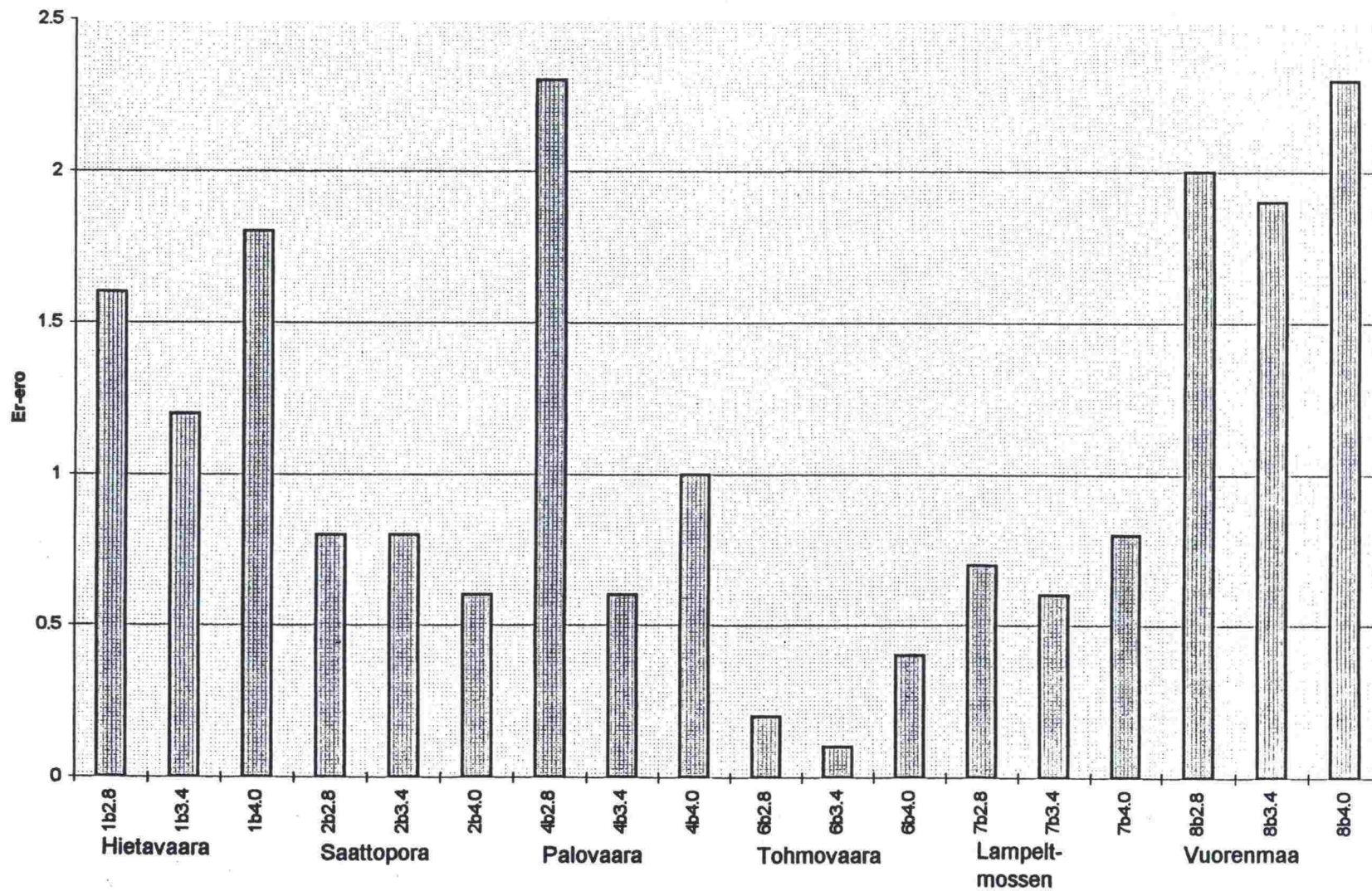


*Er (min/max)*



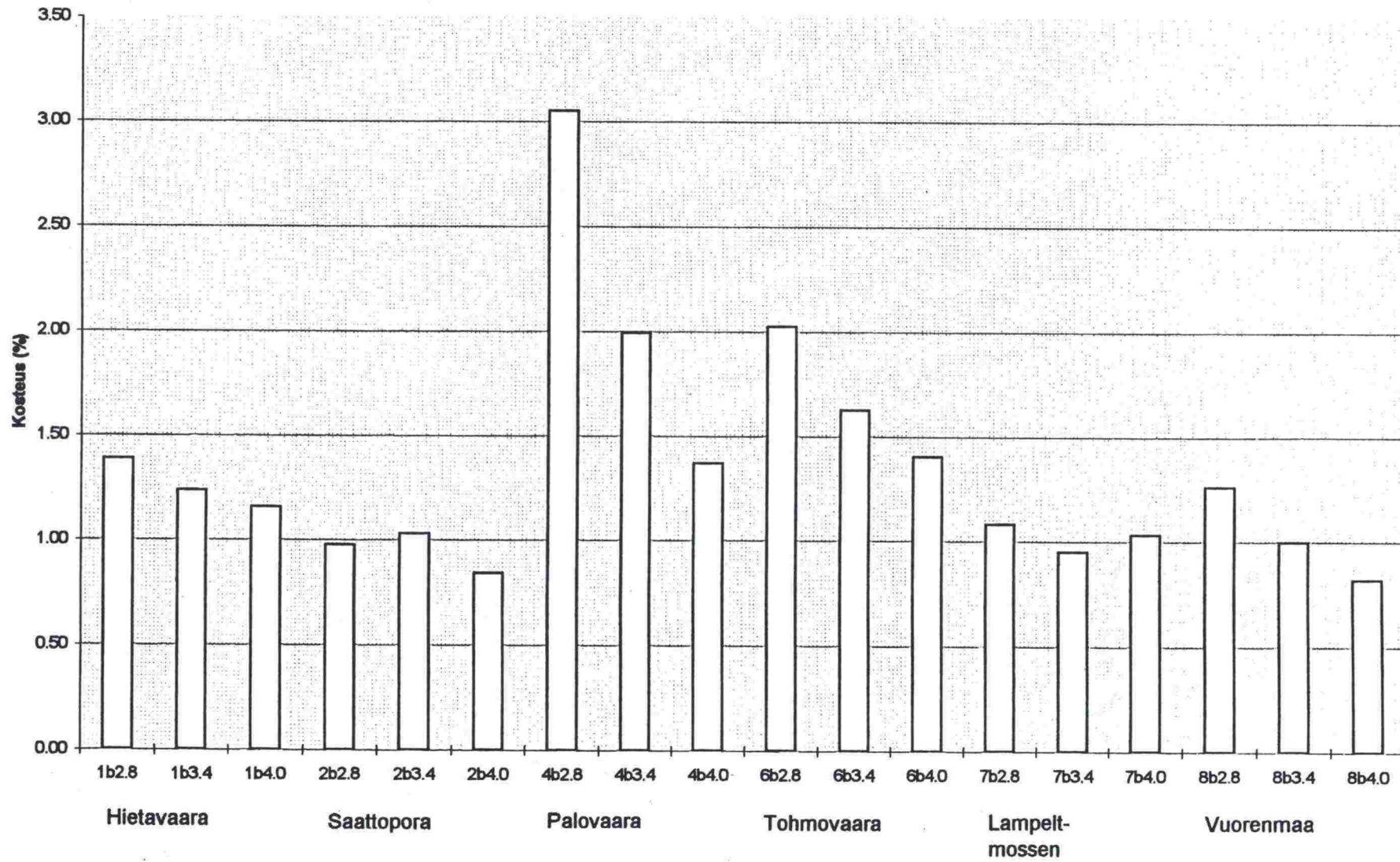


# Näytteiden Er-erot

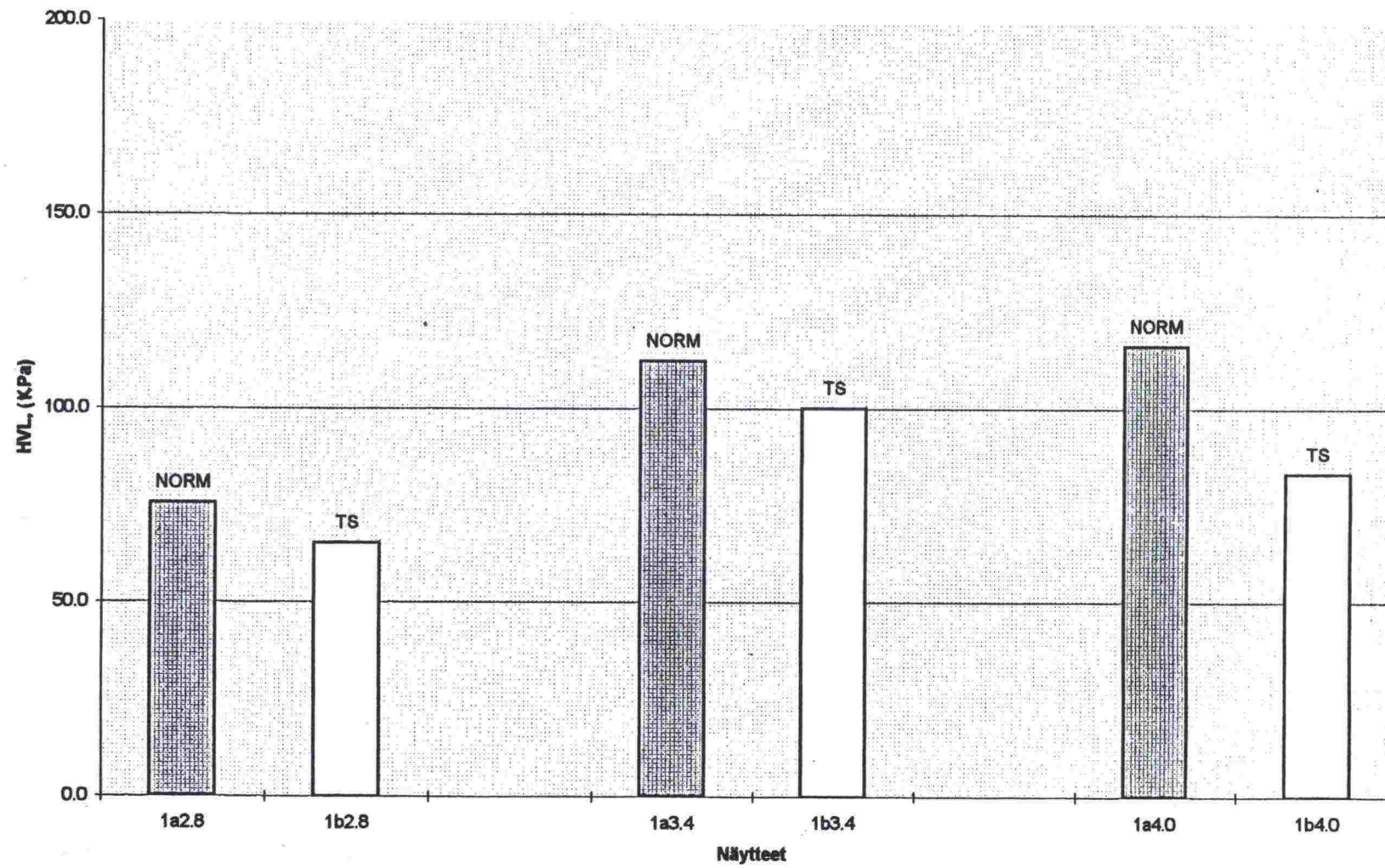




*Näytteliden kosteudet TS-kokeen jälkeen*

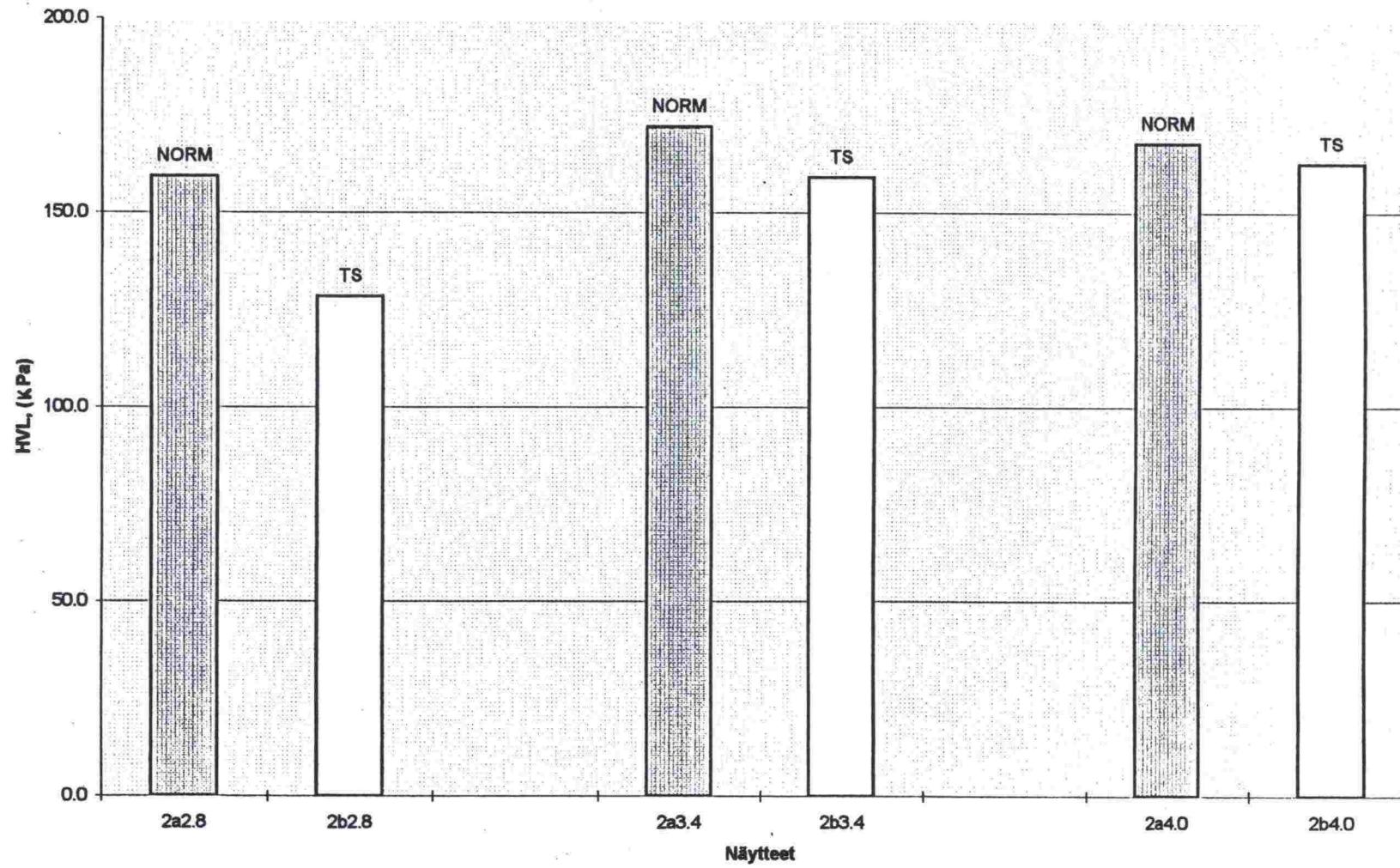


HVL, Hietavaara



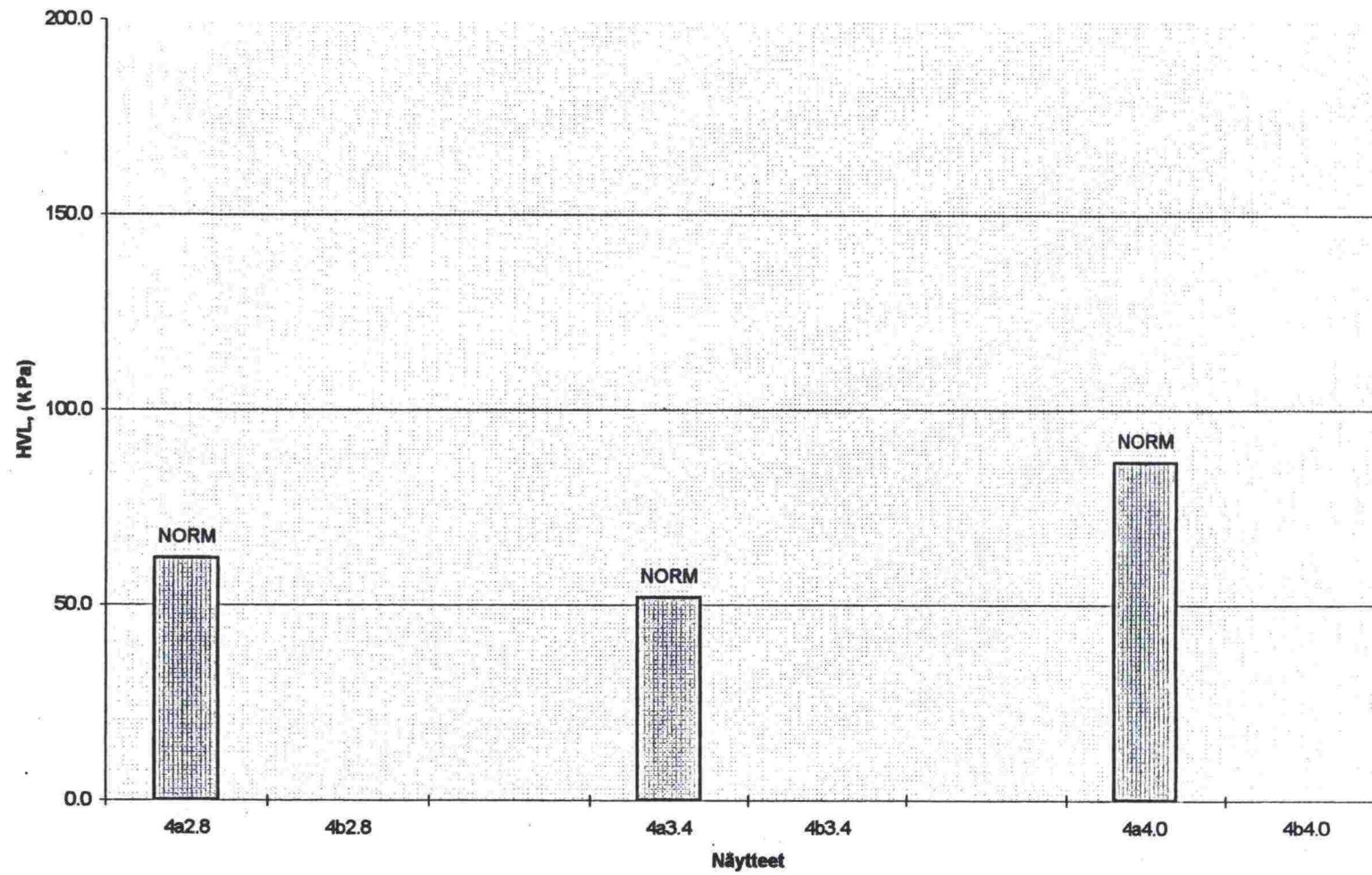


HVL, Saattopora

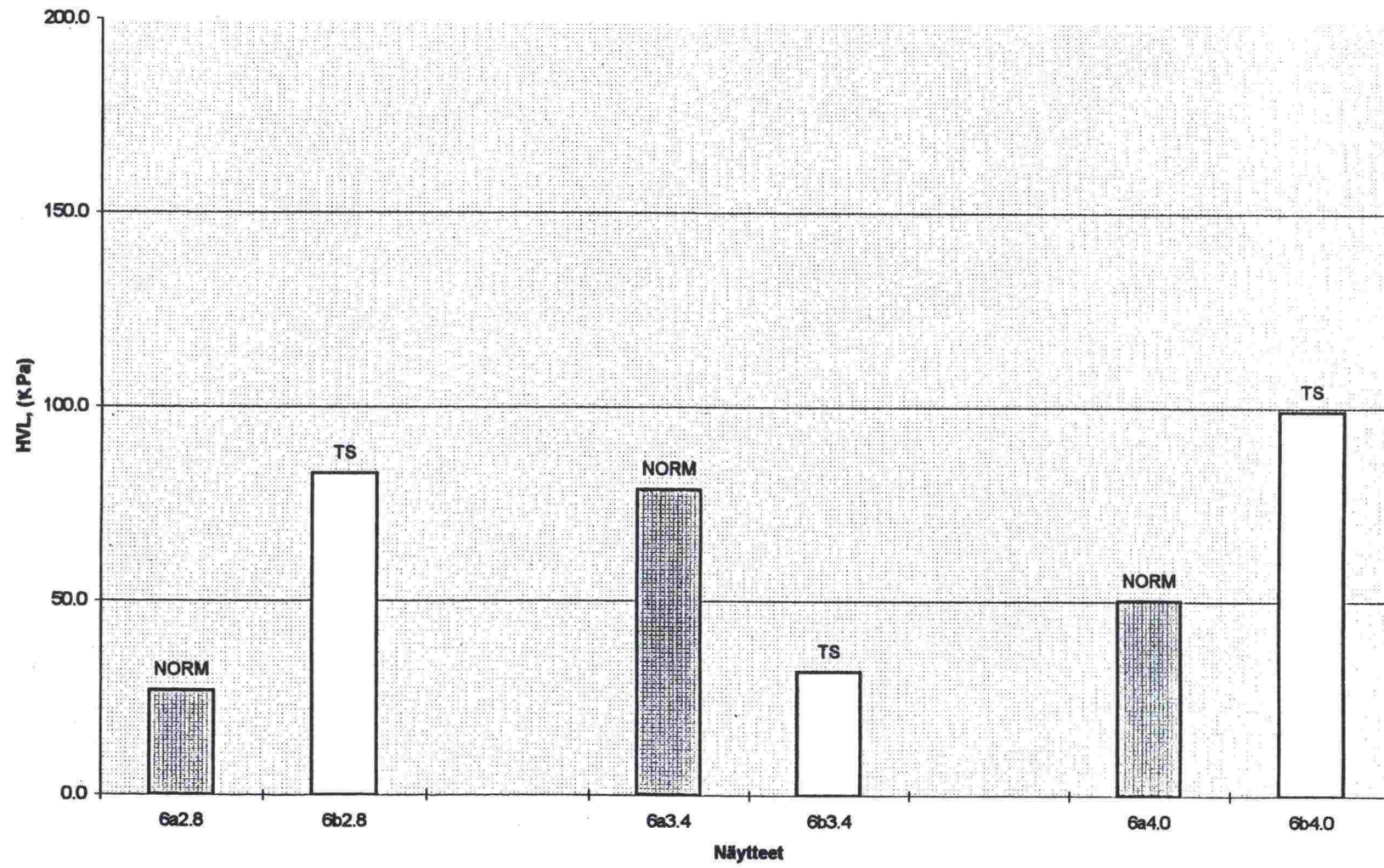




**HVL, Palovaara**

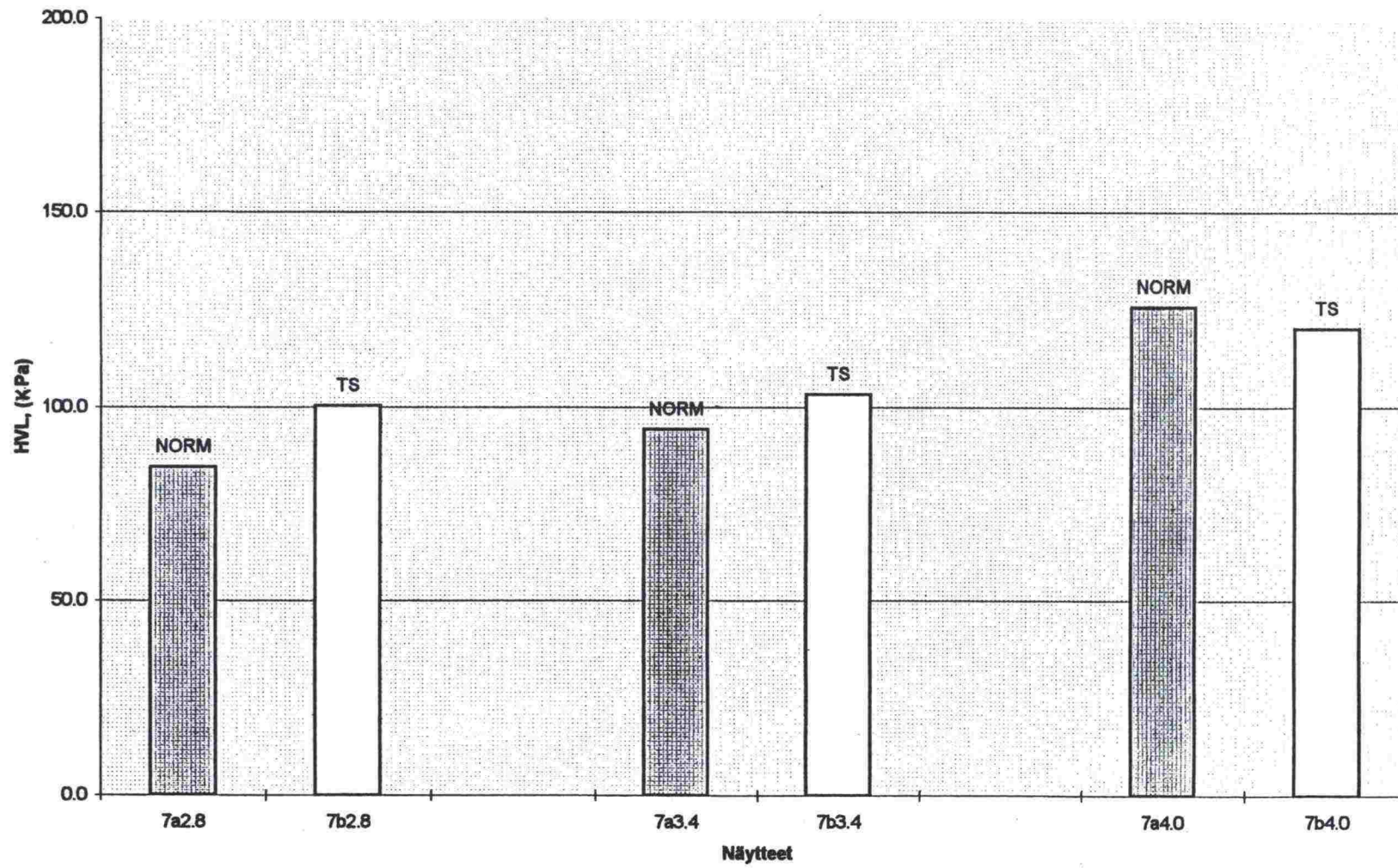


HVL, Tohmovaara



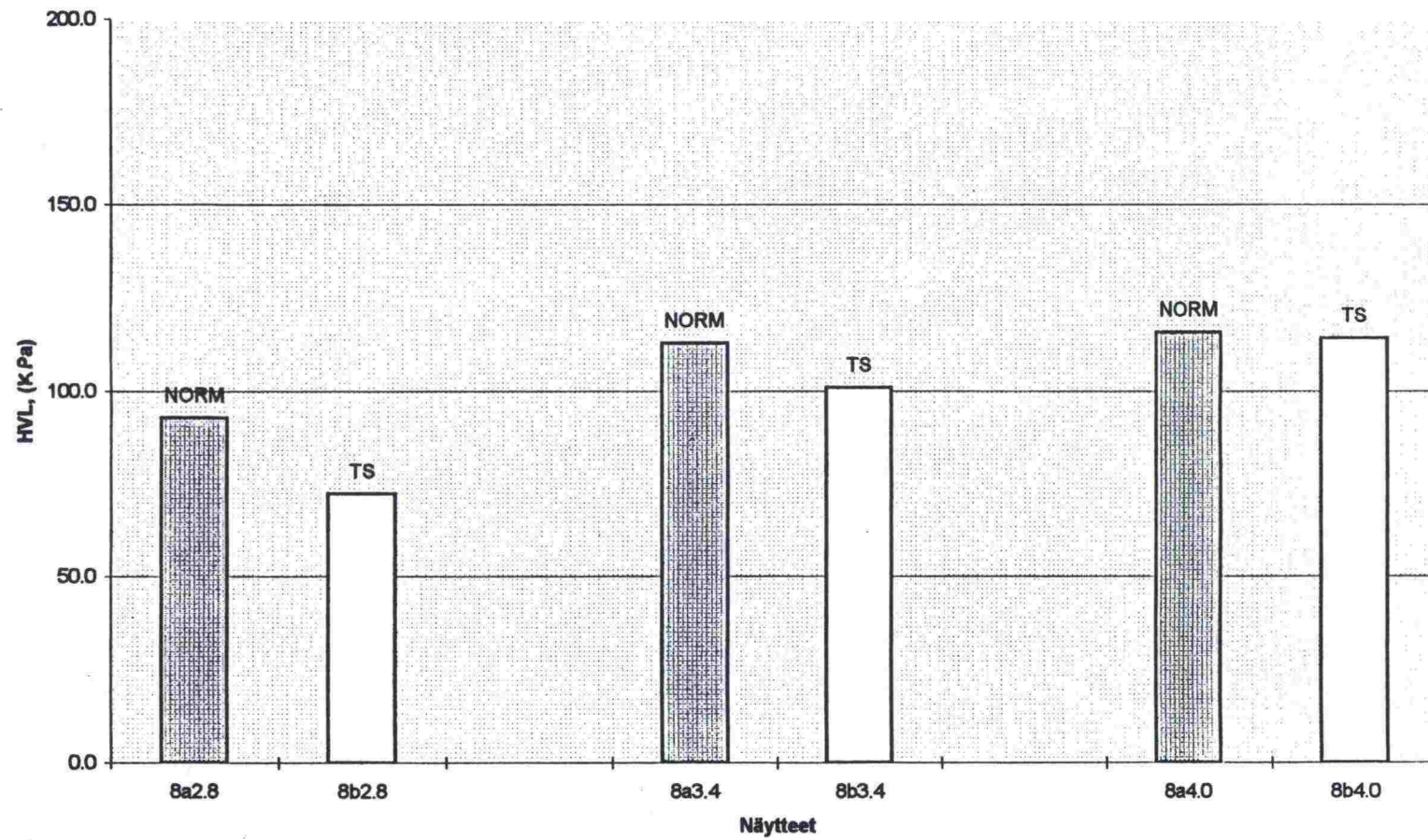


**HVL, Lampeltnossen**

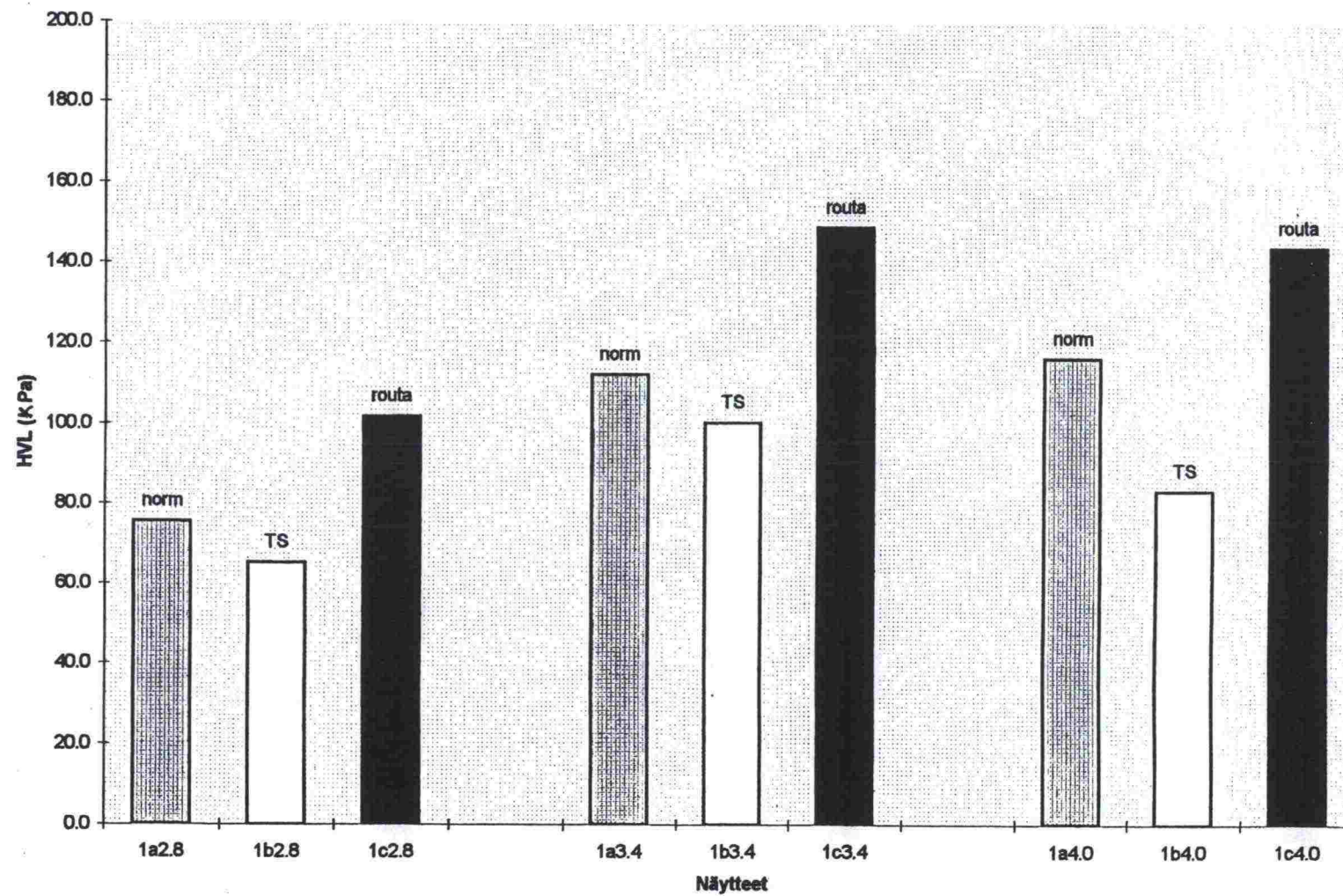




HVL, Vuorenmaa

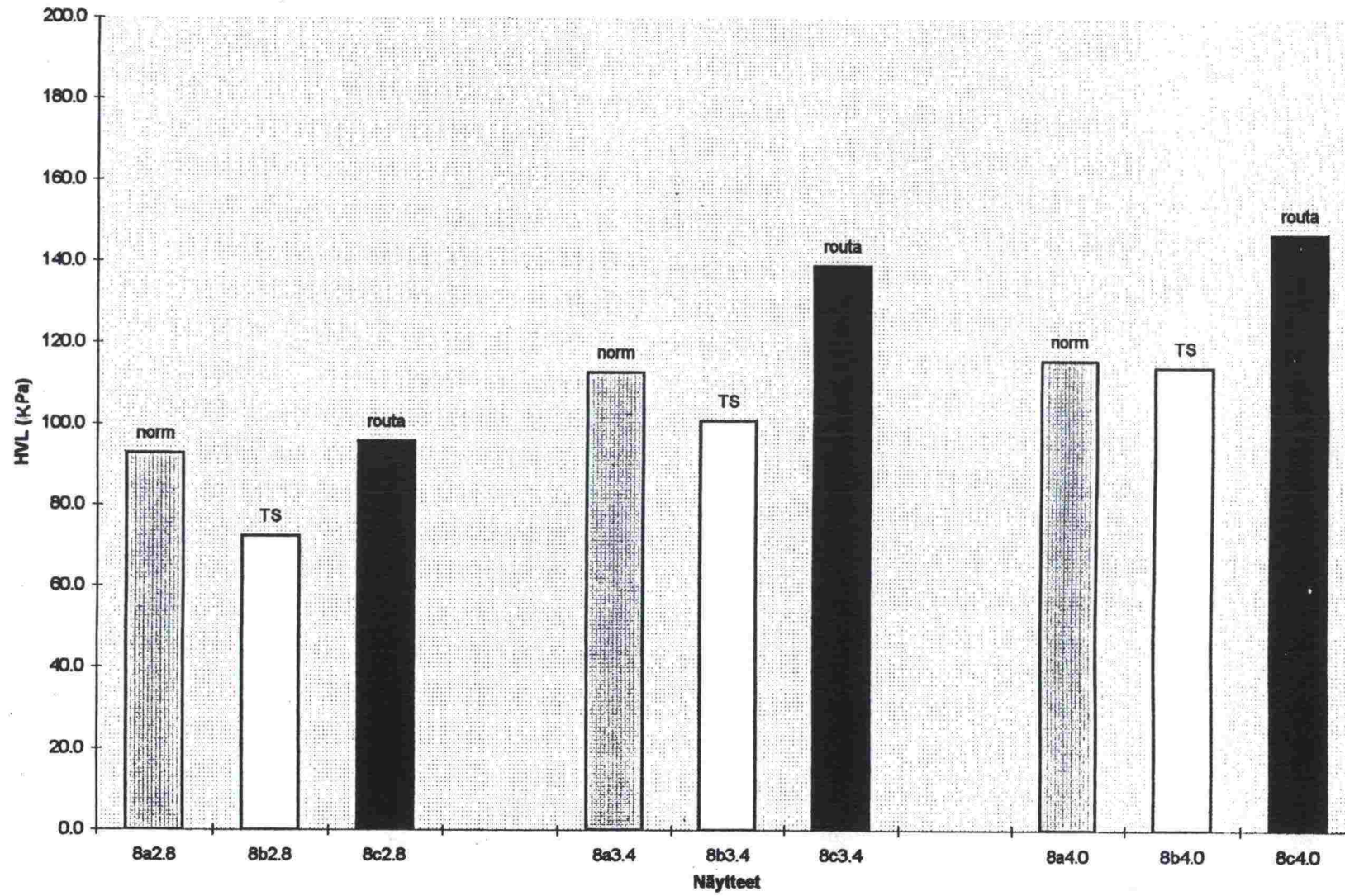


HVL, Hietavaara



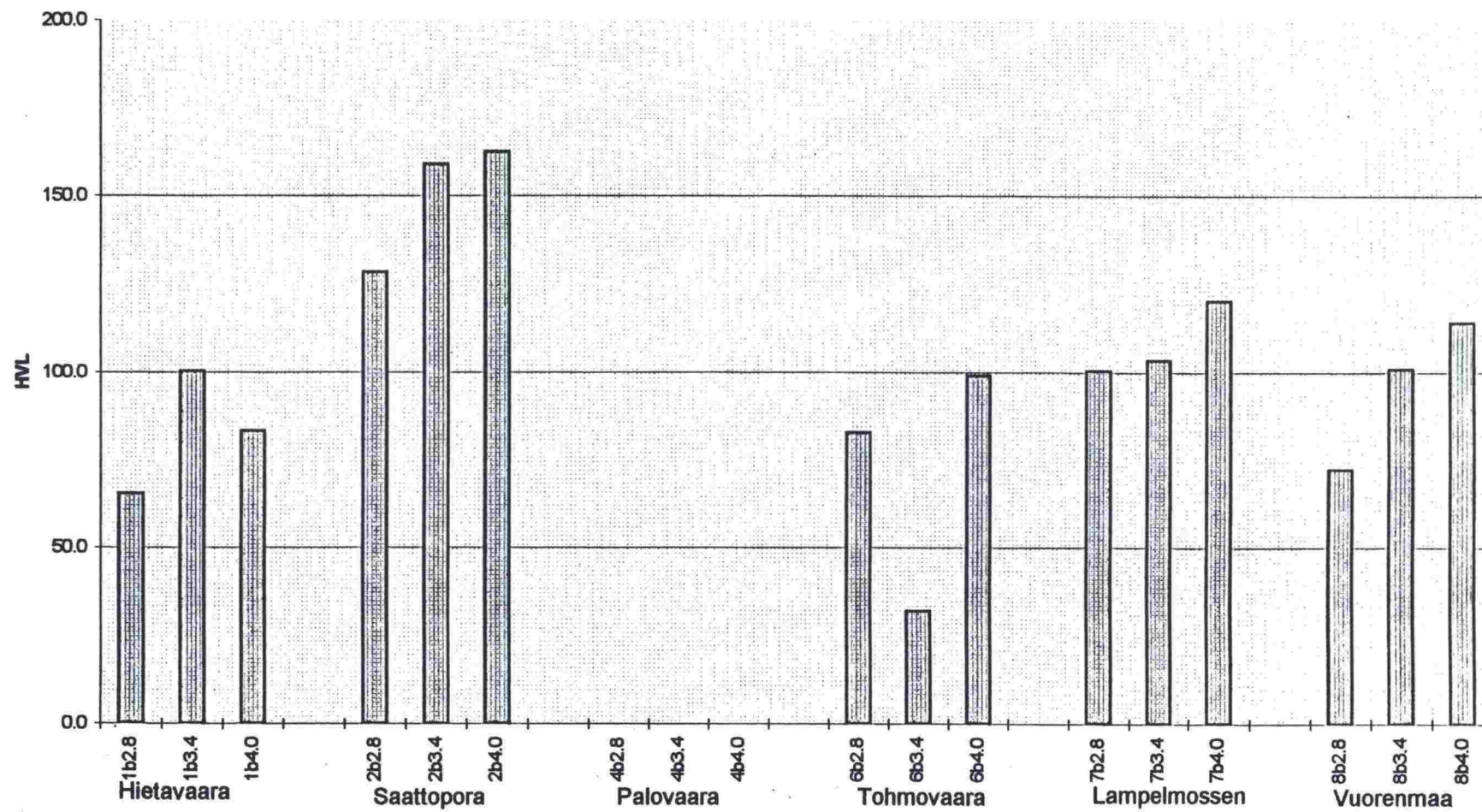


HVL, Vuorenmaa

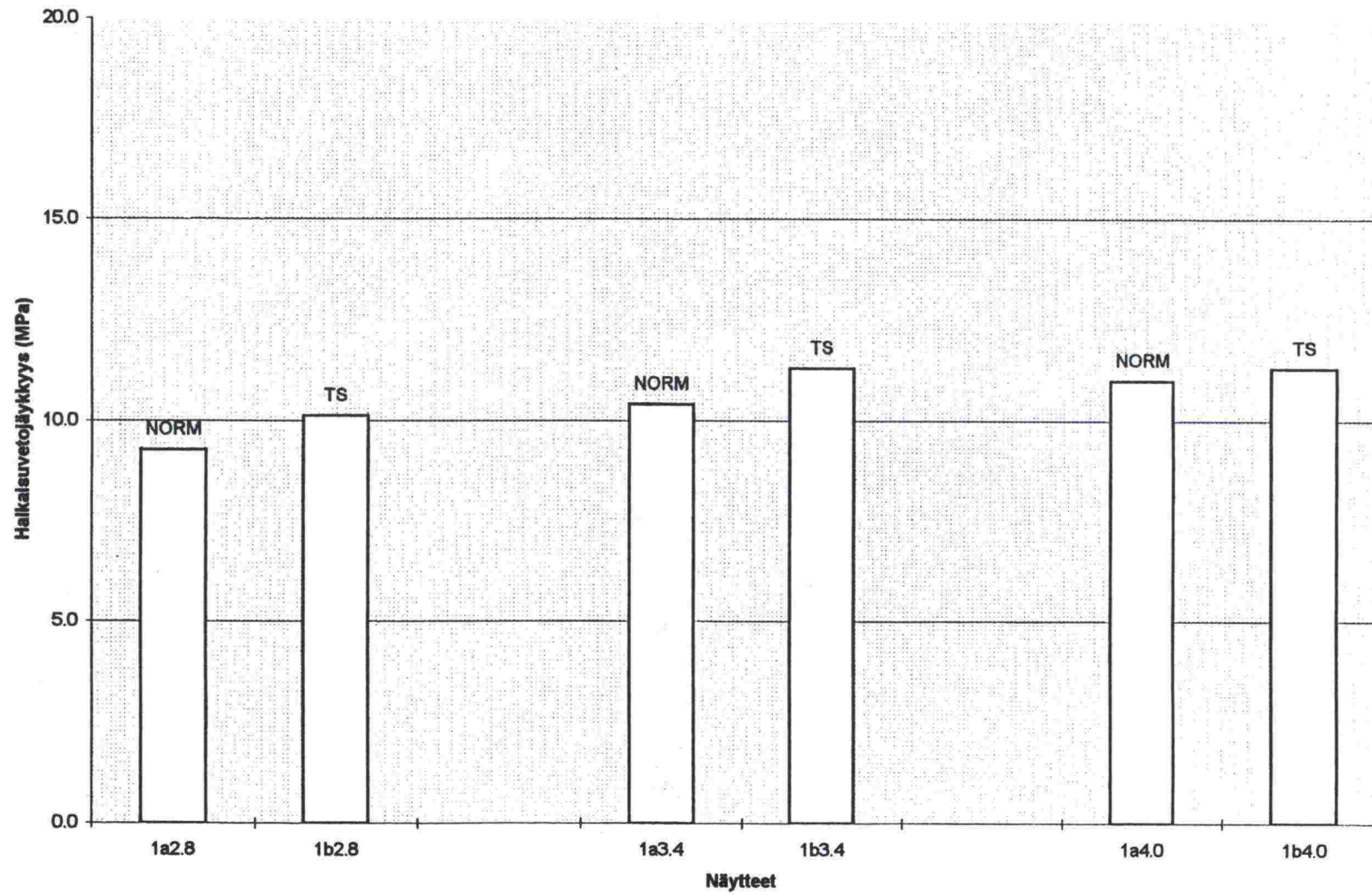




HVL, TS-kokeen jälkeen

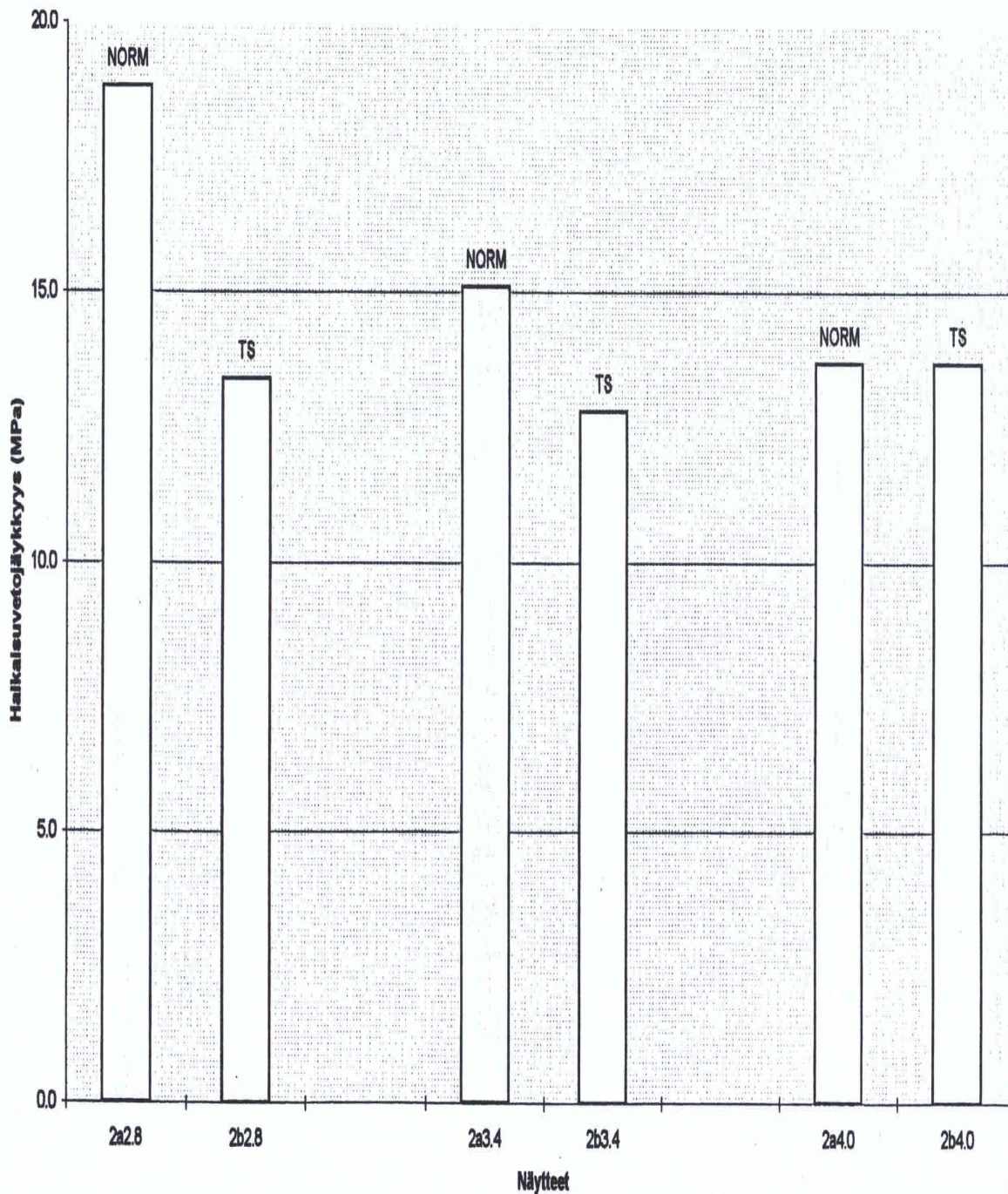


**Halkaisuvetojäykkyydet, Hietavaara**

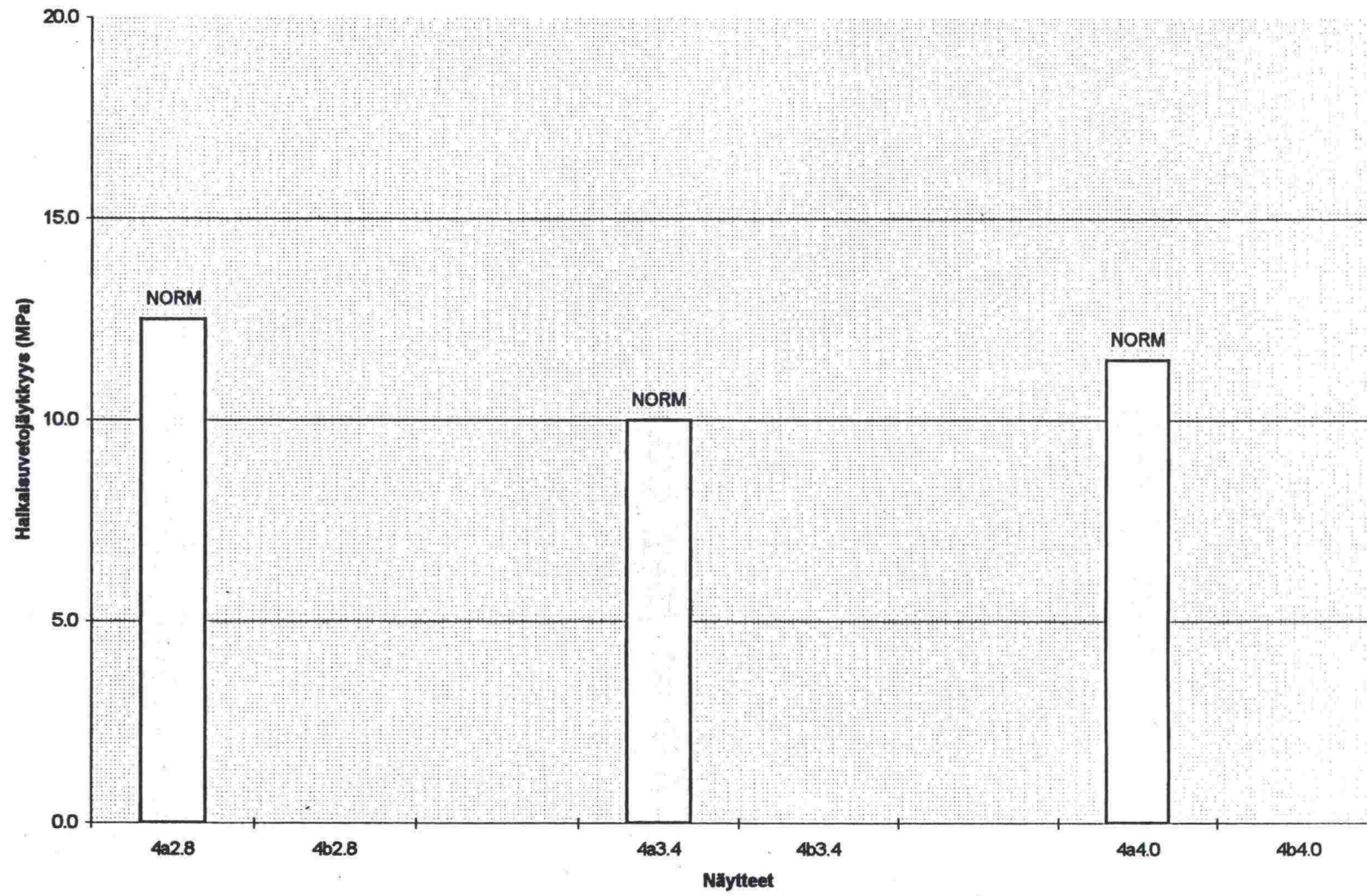




# Halkaisuvetojäykkyydet, Saattopora

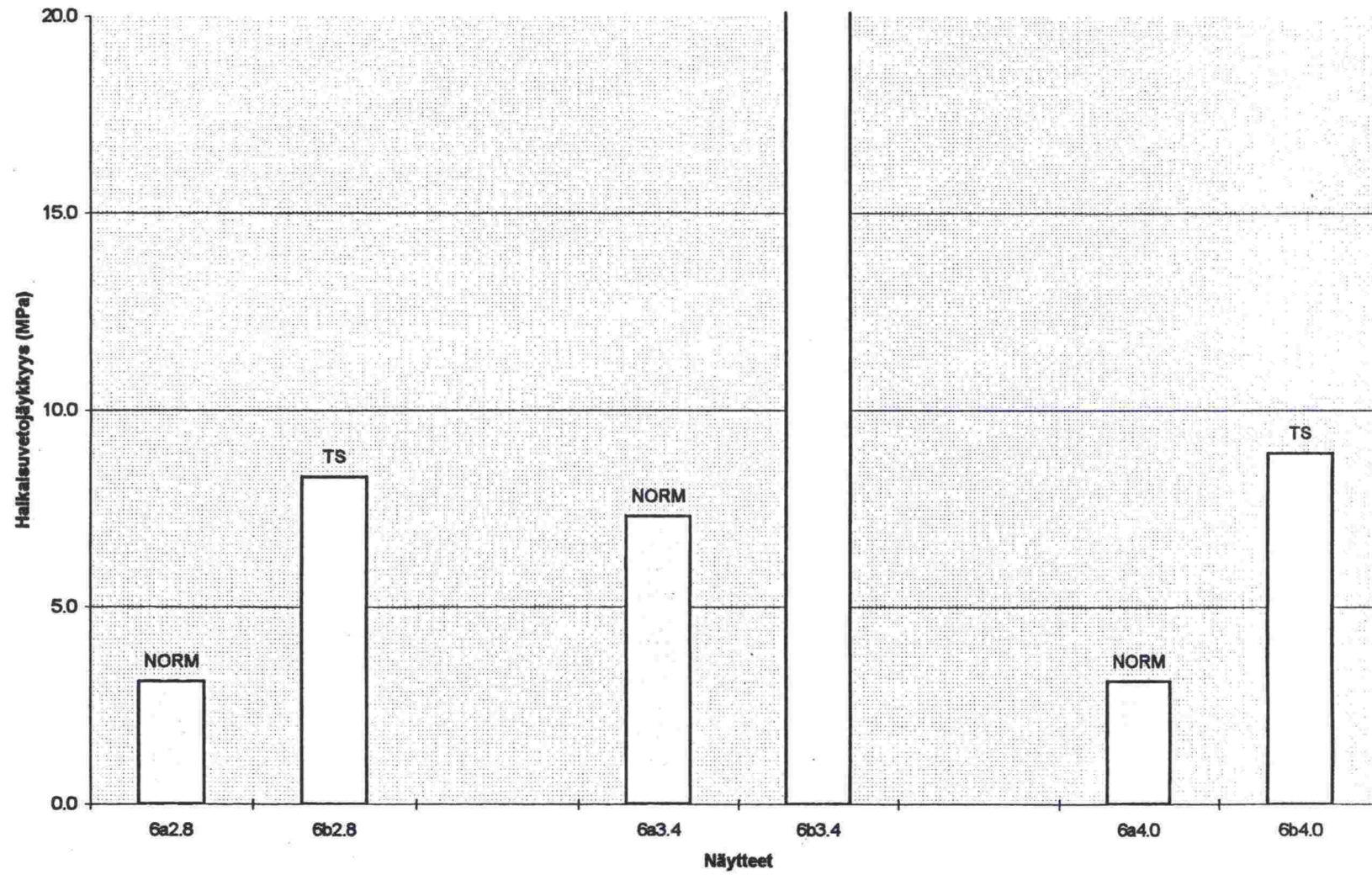


**Halkaisuvetojäykkyydet, Palovaara**

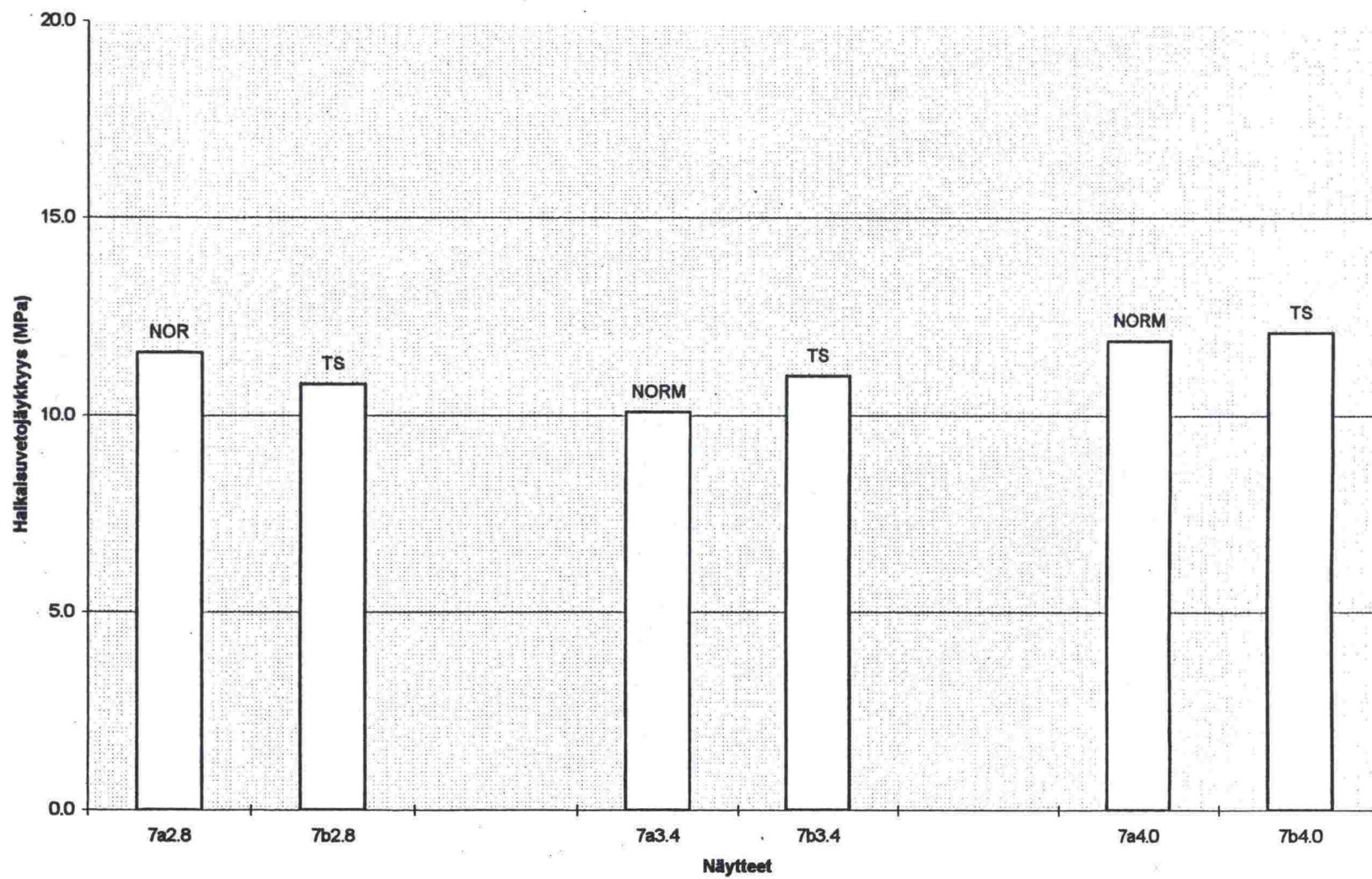




**Halkaisuvetojäykkyydet, Tohmovaara**

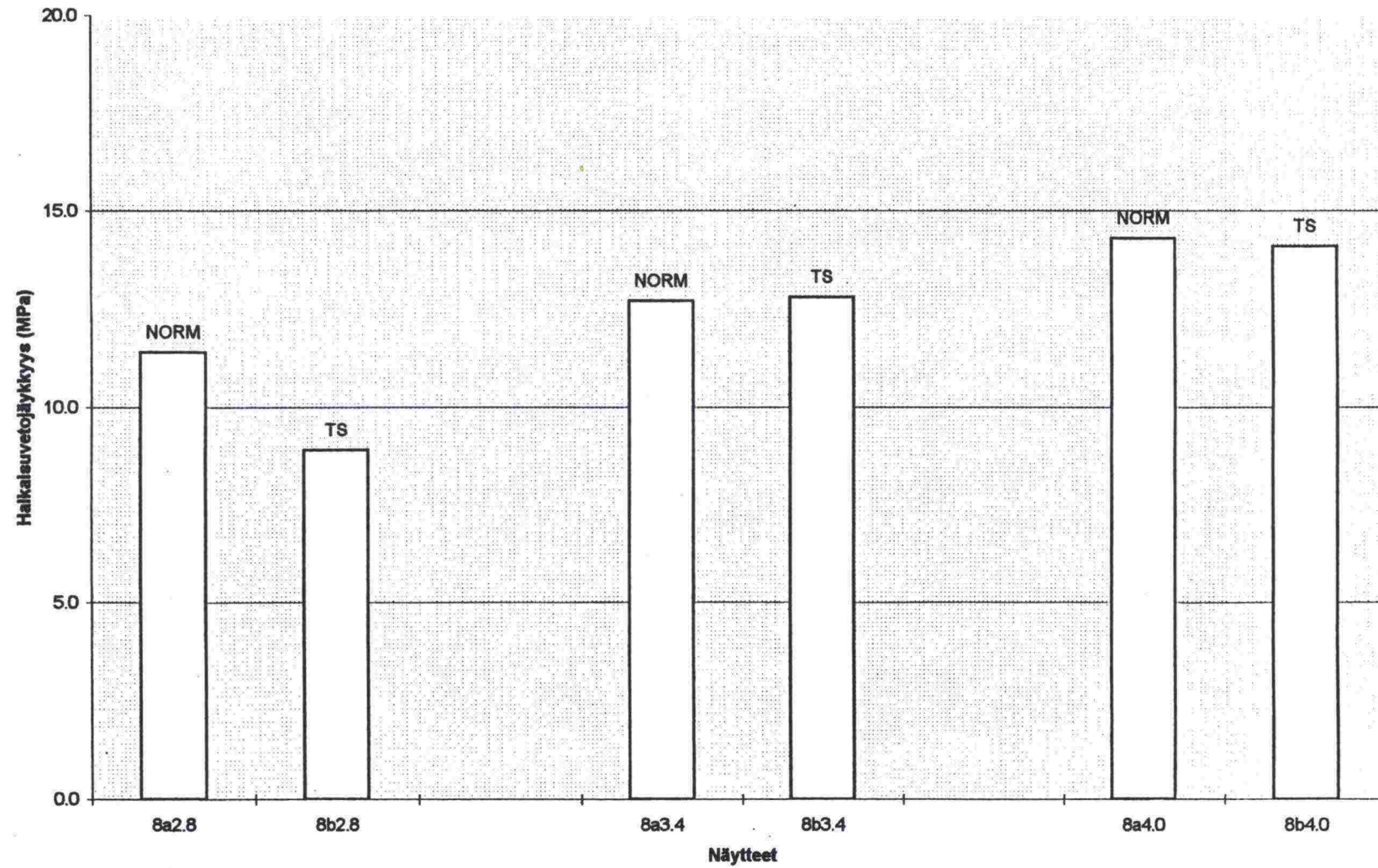


**Halkaisuvetojäykkyydet, Lampeltmossen**

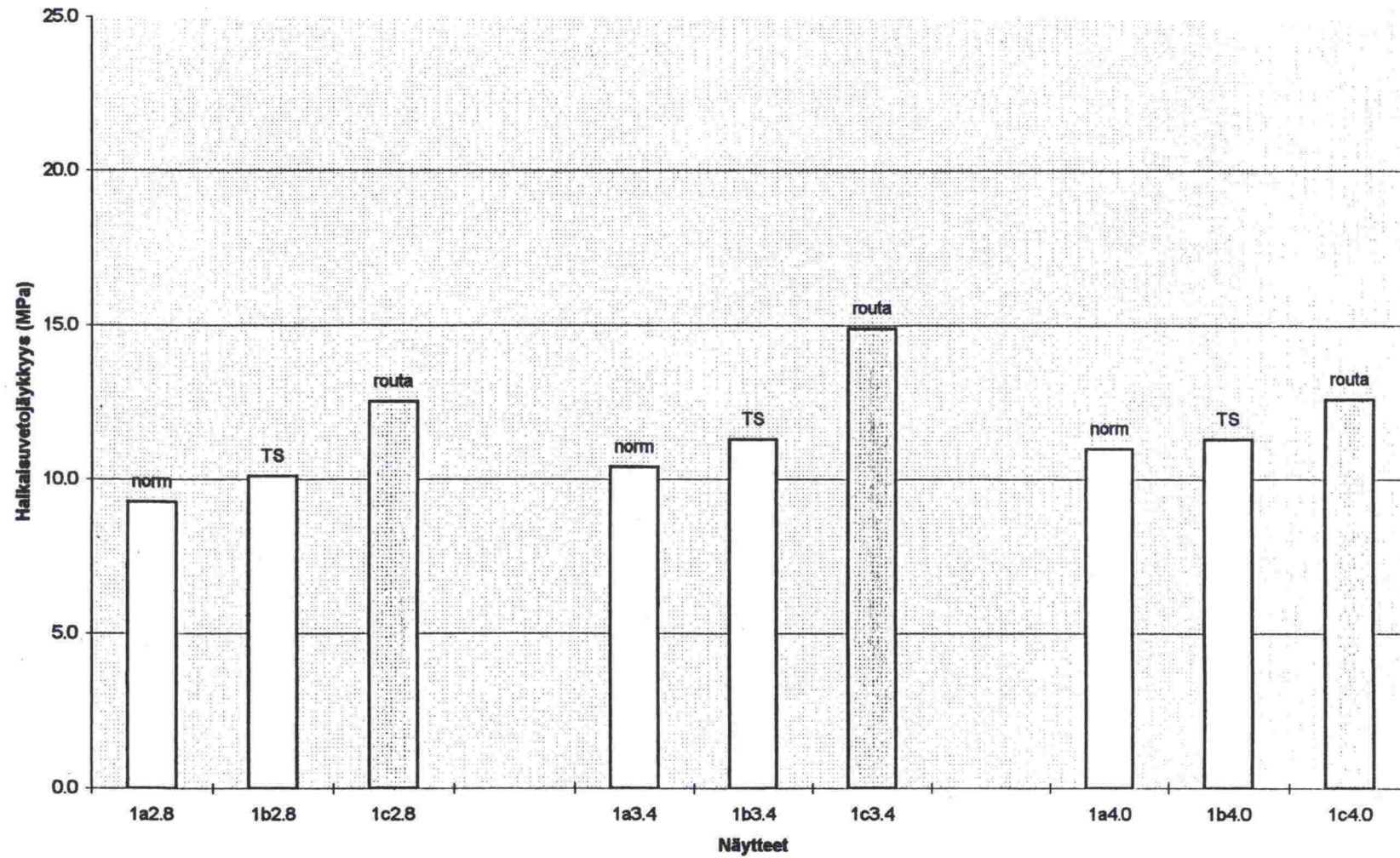




**Halkalsuvetojäykkyydet, Vuorenmaa**

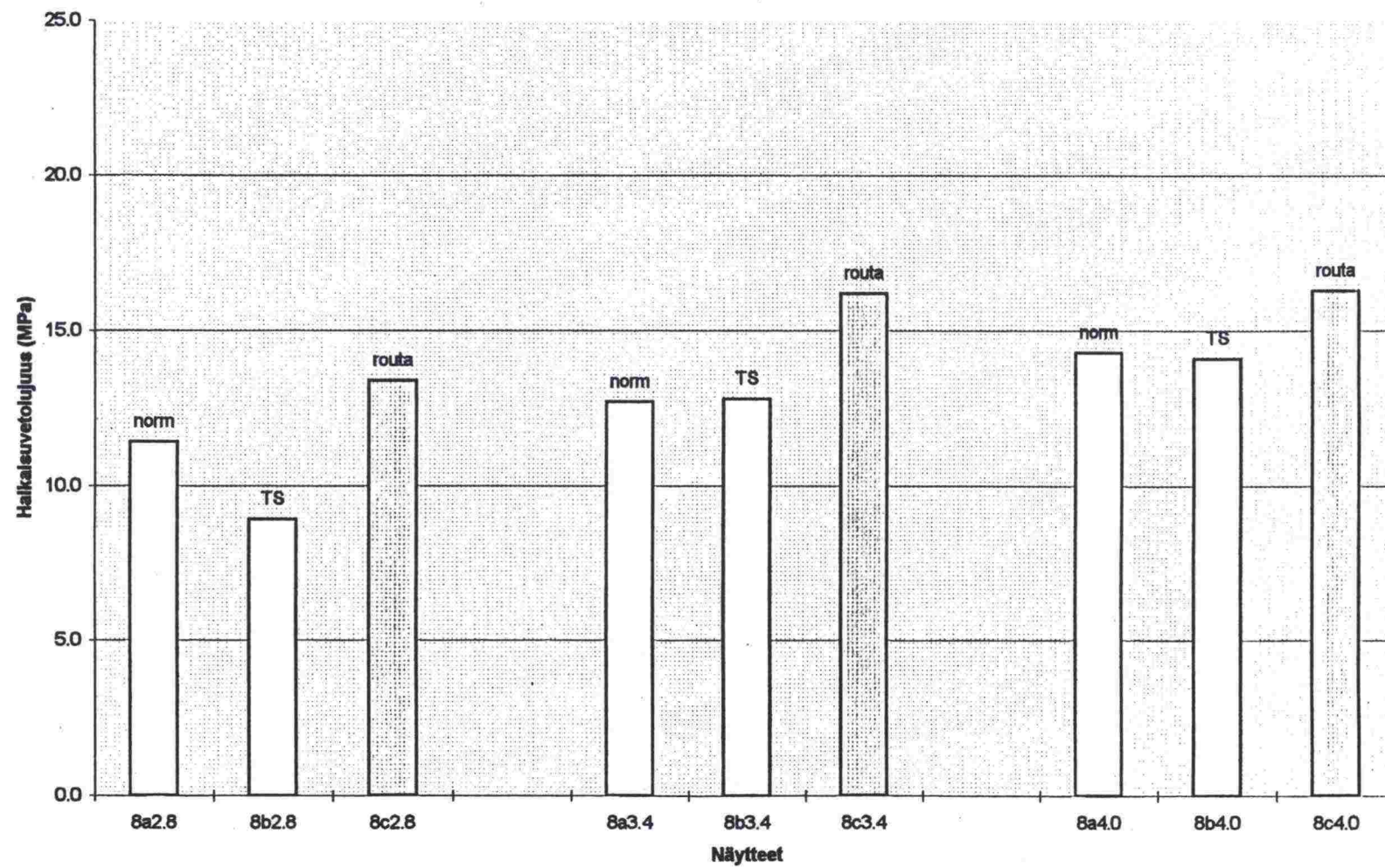


**Halkaisuvetojäykkyydet, Hietavaara**

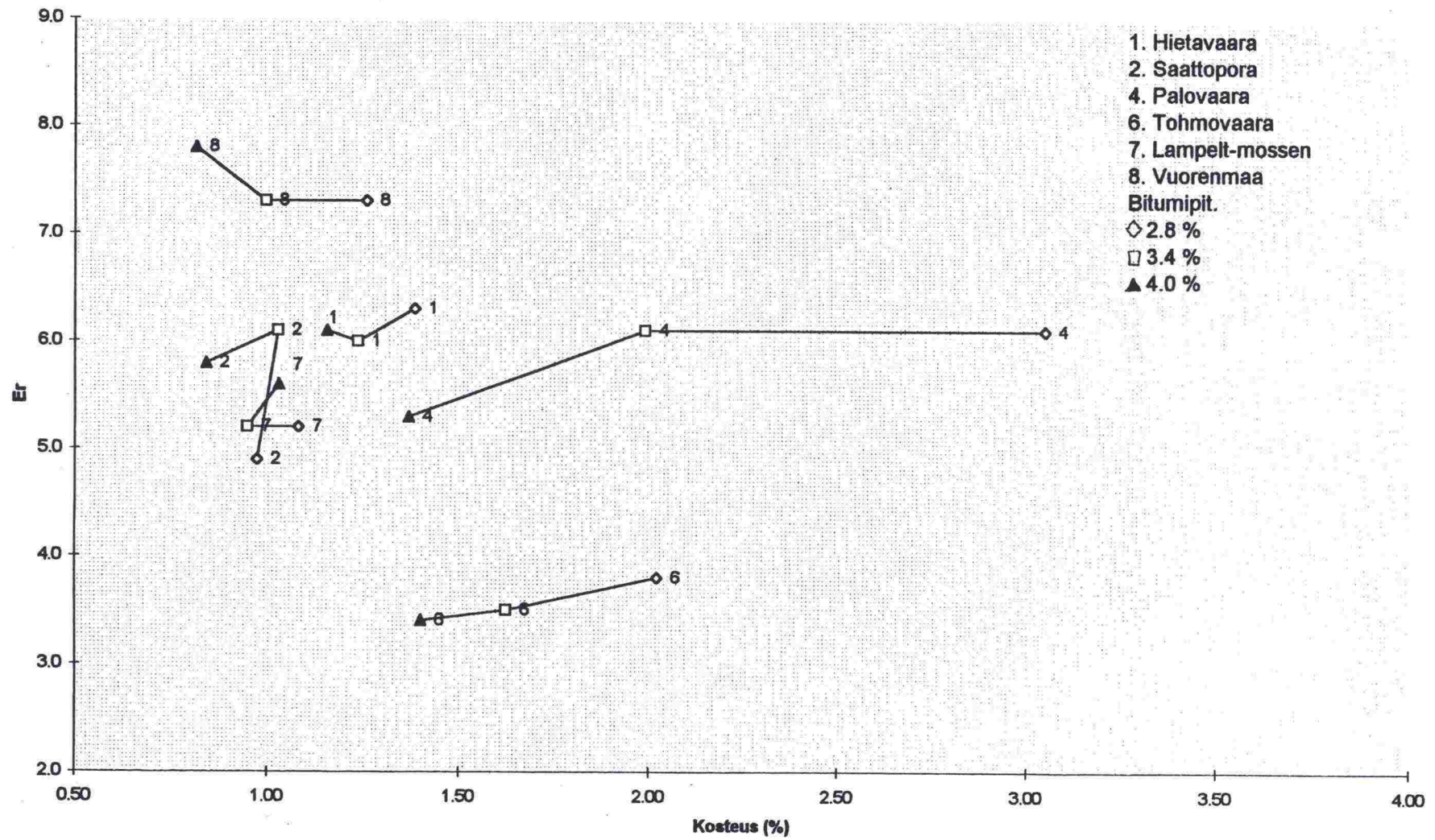




# Halkaisuvetojäykkyydet, Vuorenmaa

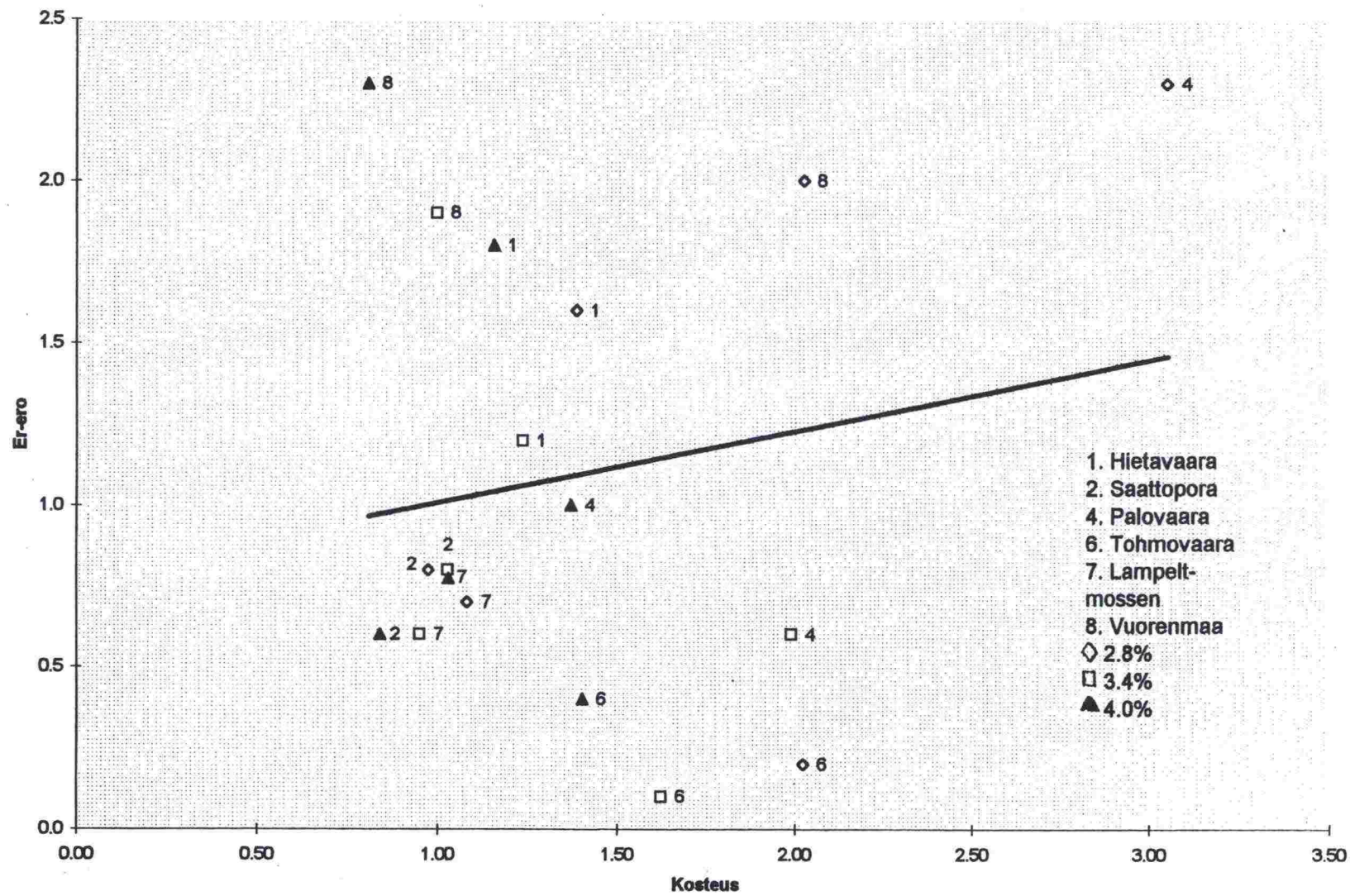


Kosteus / Er(max)



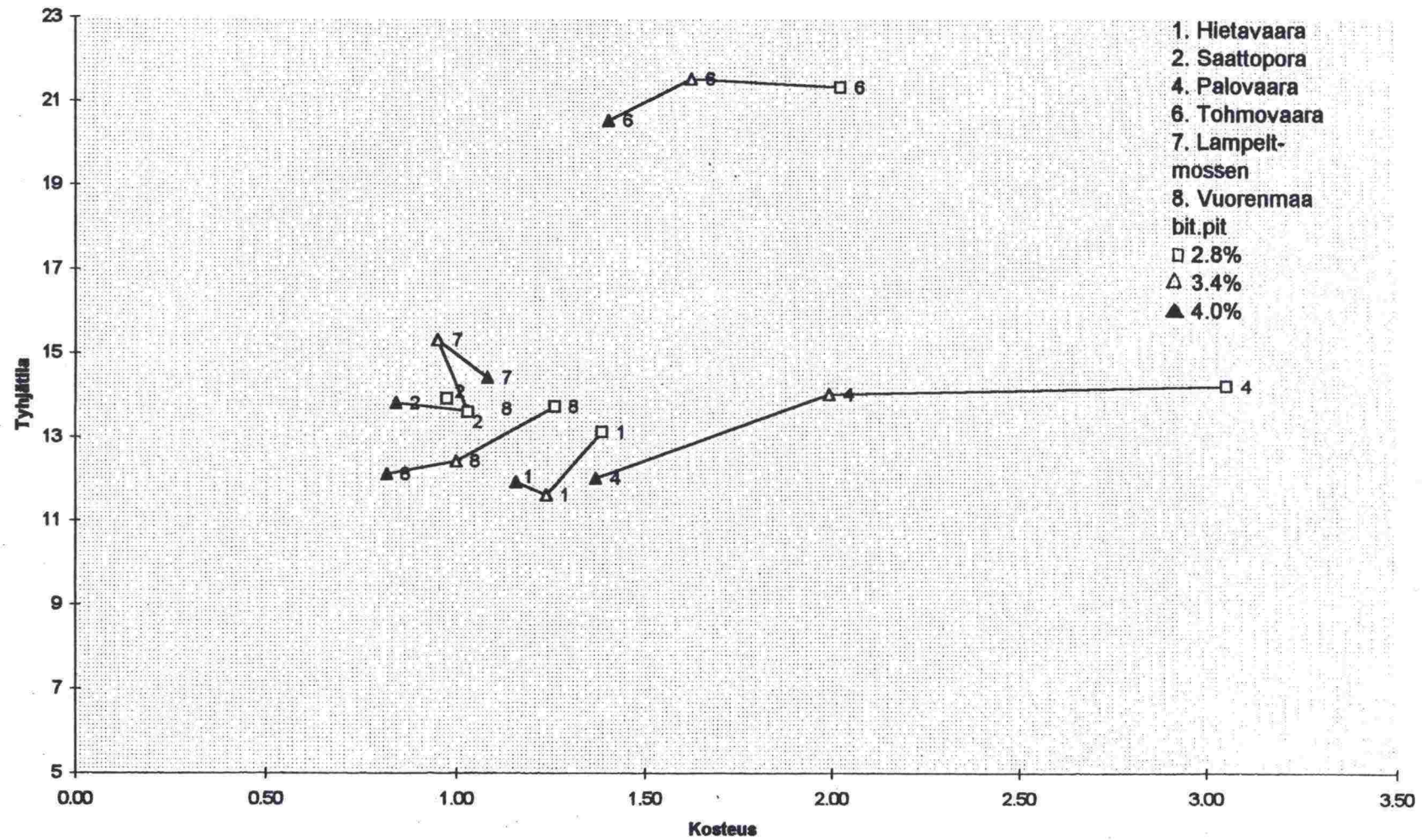


# Kosteus / Er-erot



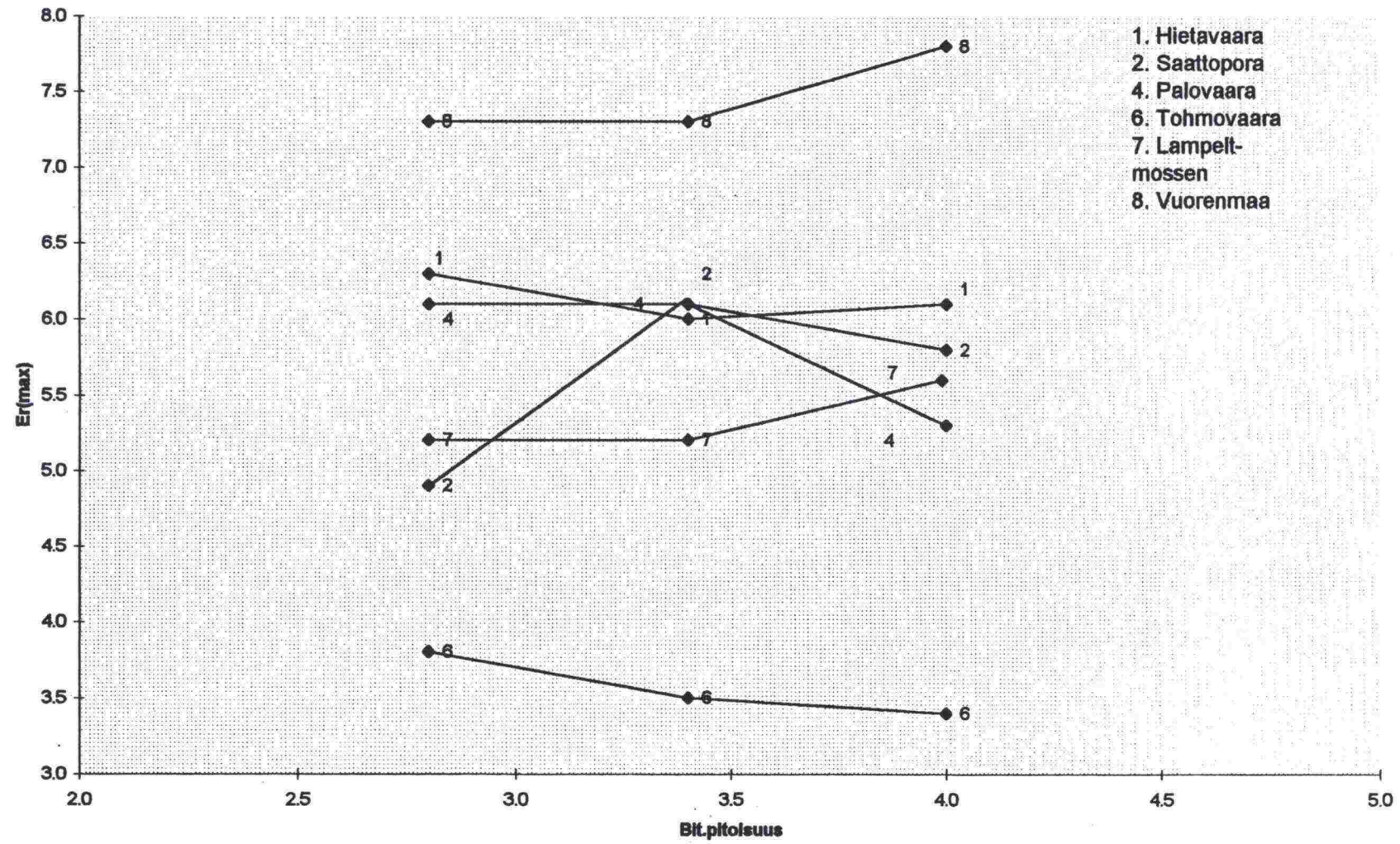


# Kosteus / Tyhjättila



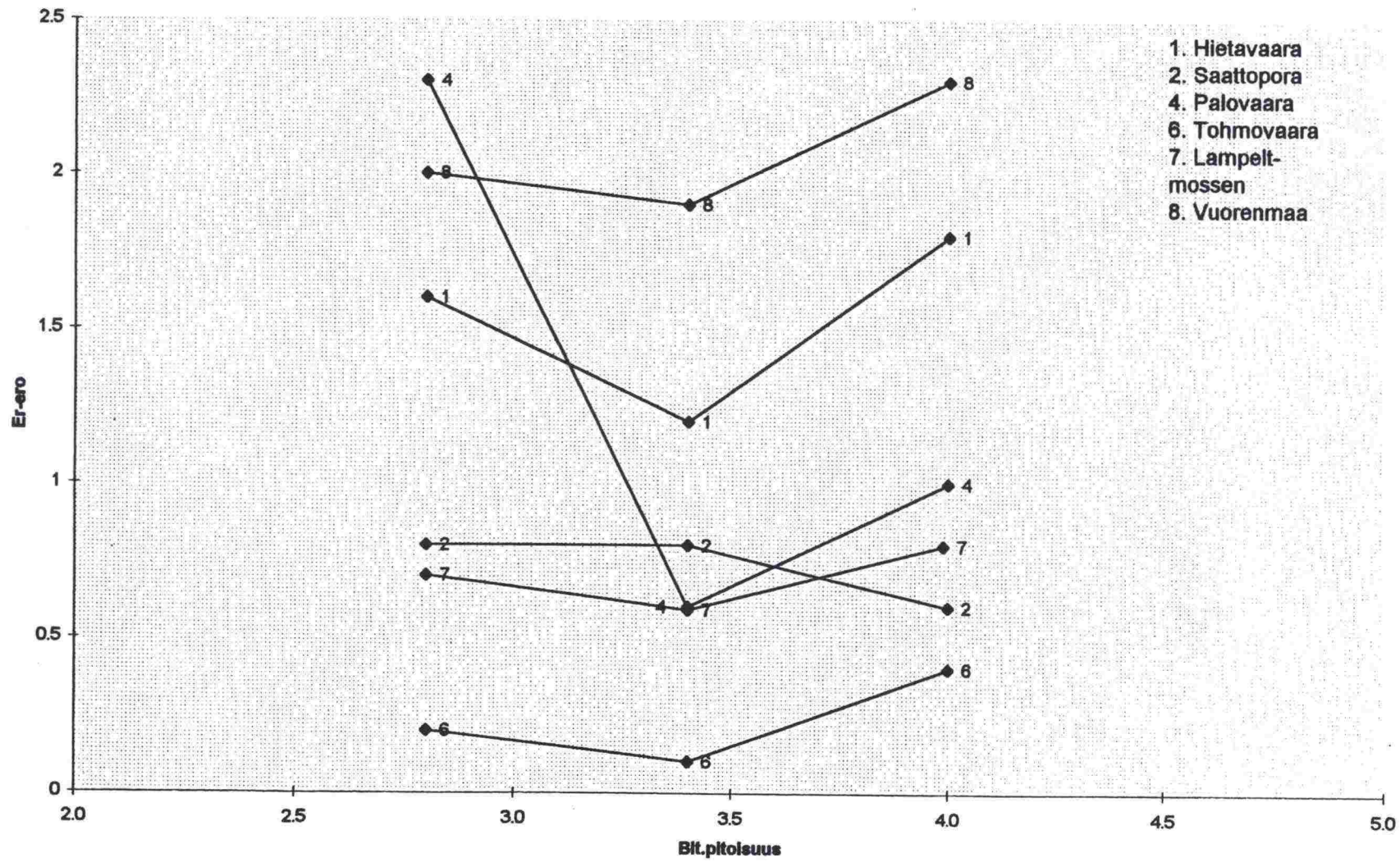


*Bitumipitoisuus / Er(max)*



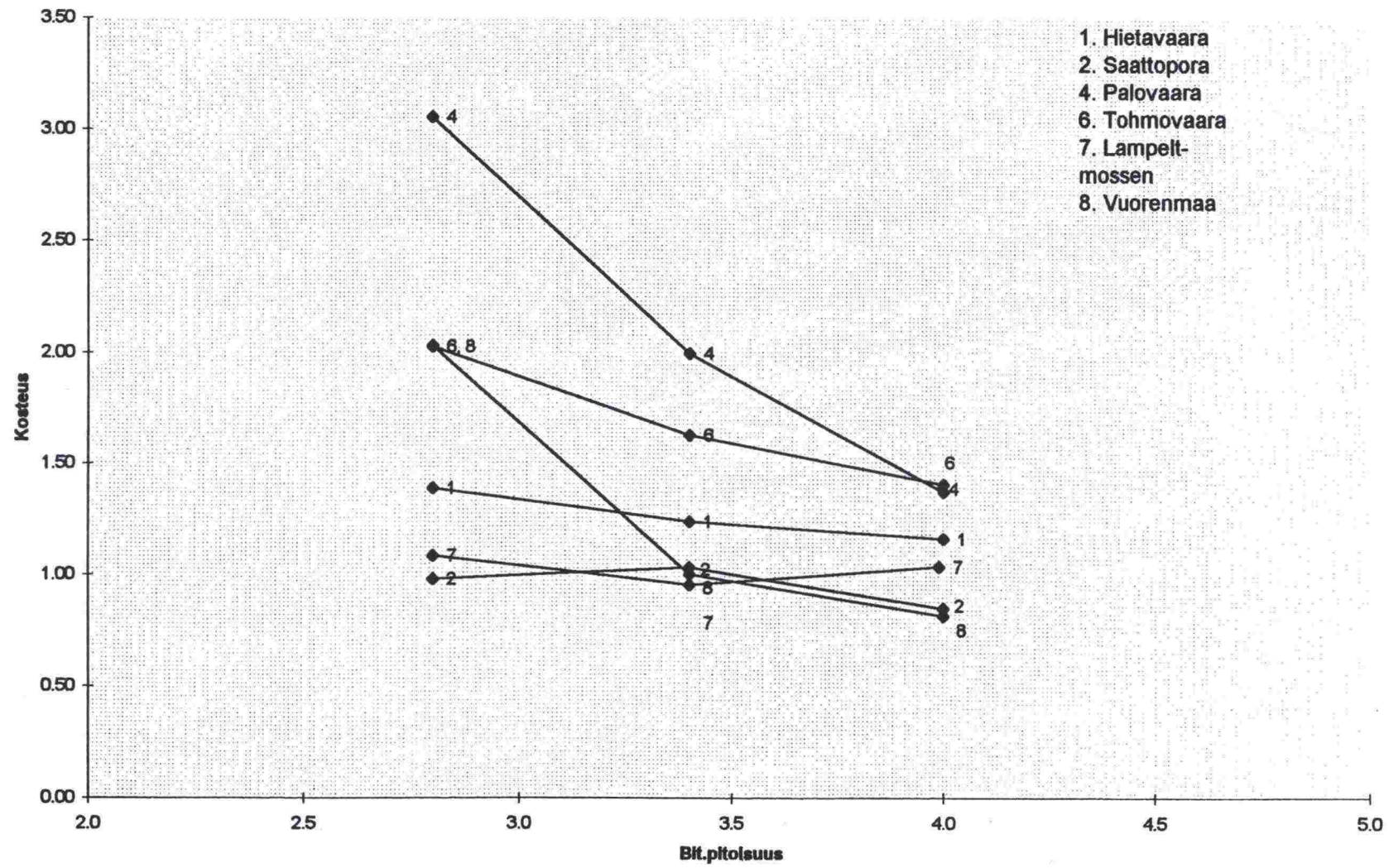


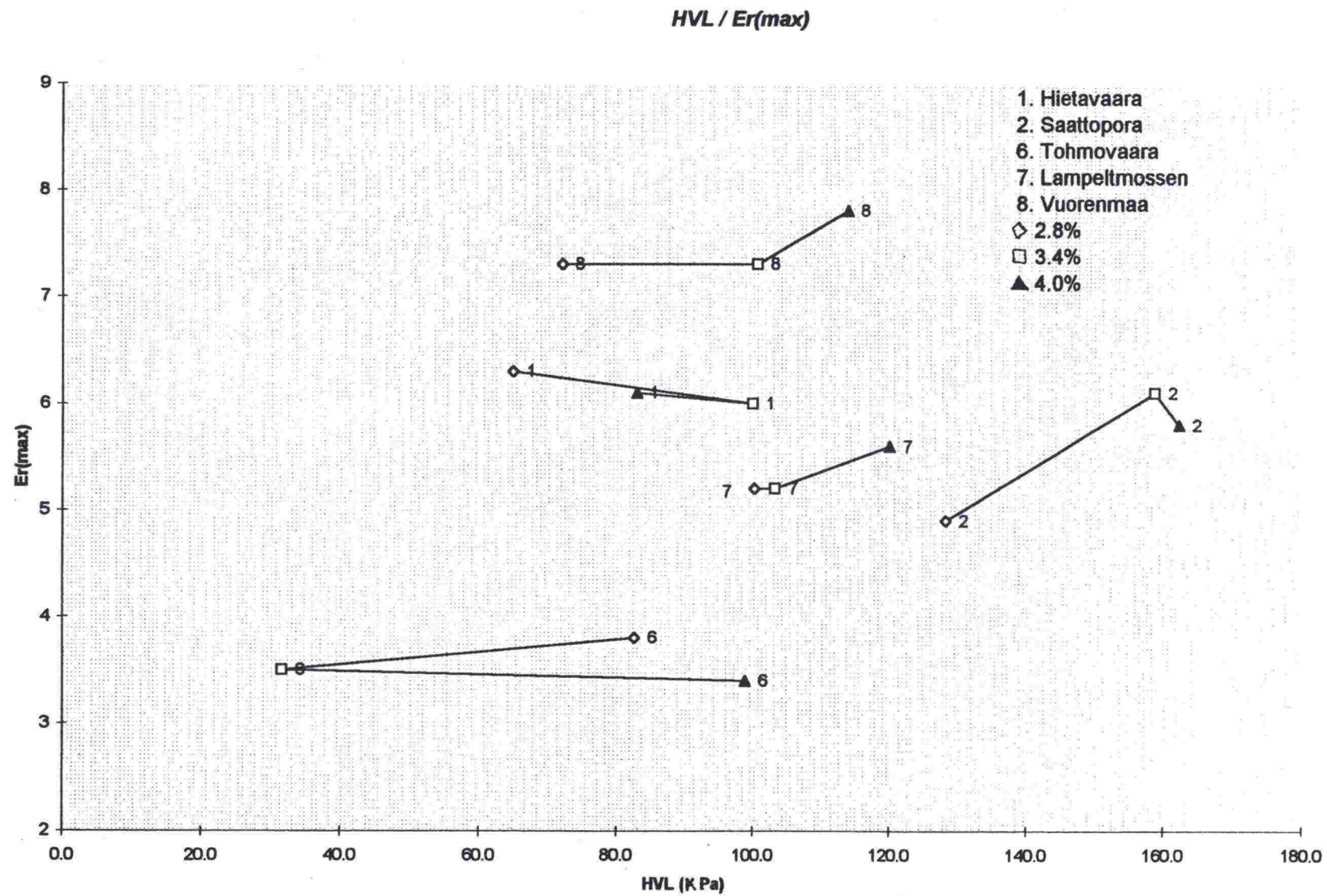
*Bitumipitoisuus / Er-ero*





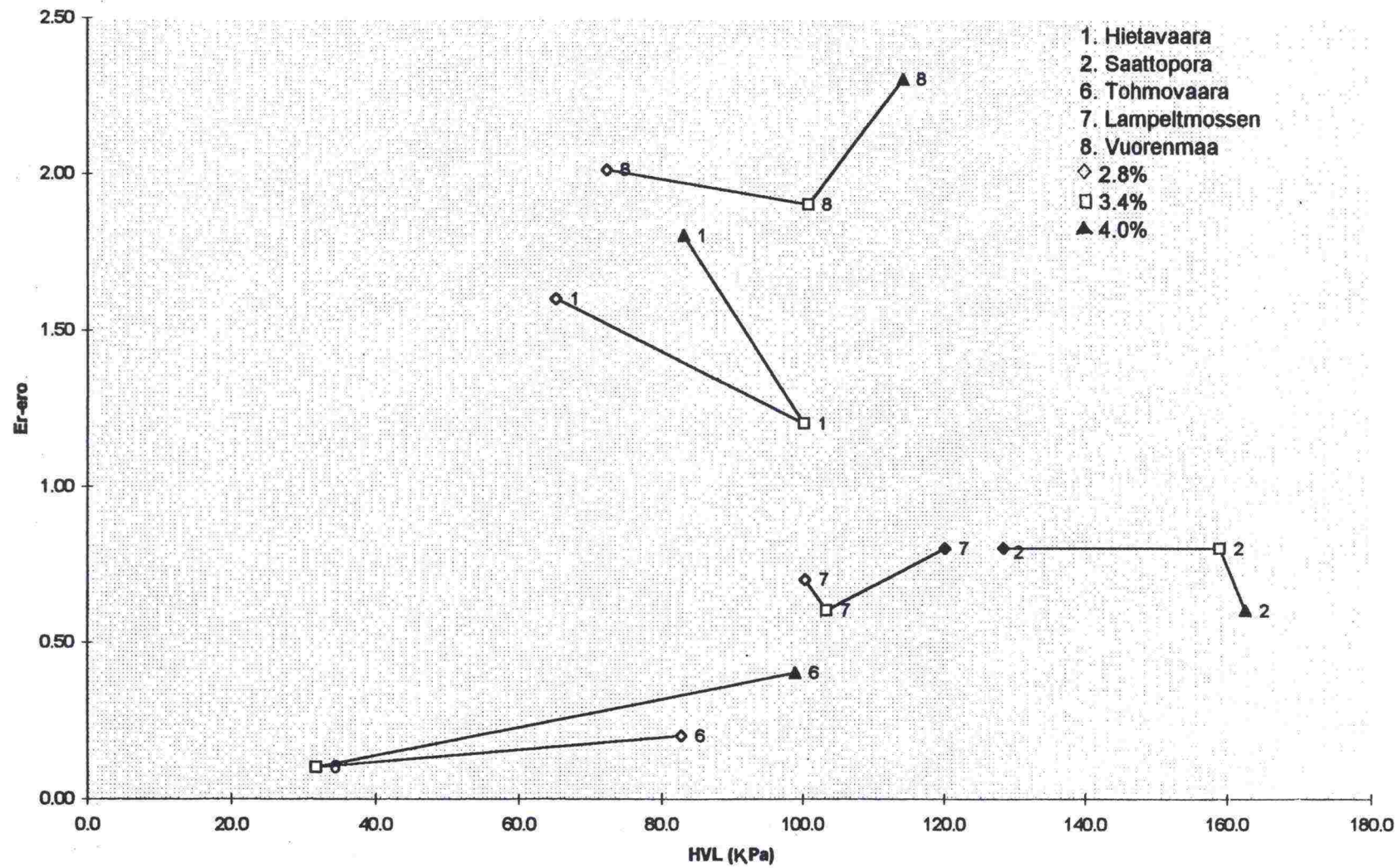
*Bit.pitoisuus / Kosteus*



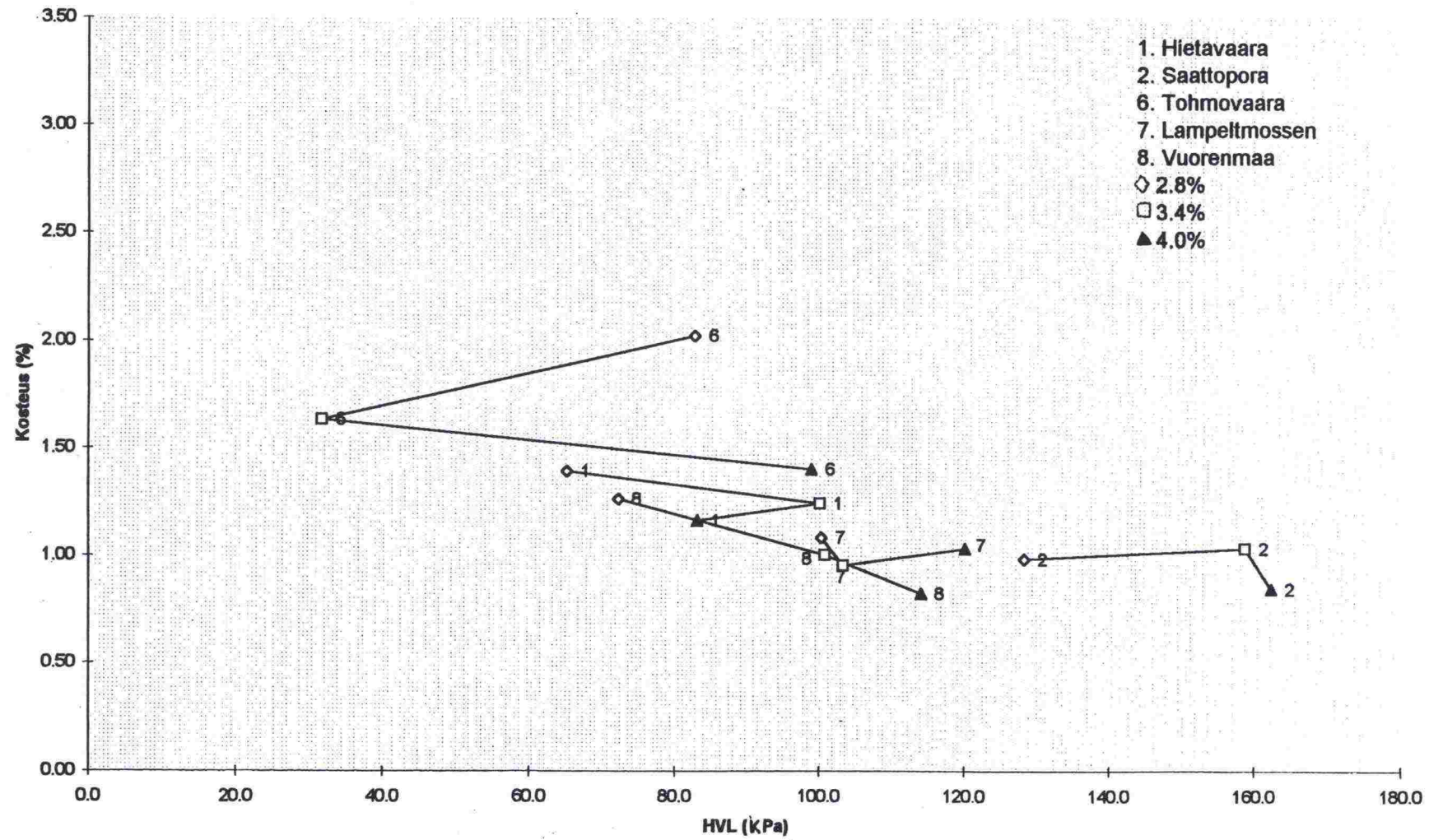




# HVL / Er-ero



# HVL / Kosteus





The scatter plot displays the relationship between moisture content (Kosteus (%)) on the y-axis and ash content (Hienoainespitoisuus (#0.074 mm) %) on the x-axis. The y-axis ranges from 0 to 7, and the x-axis ranges from 0.0 to 9.0. A regression line is shown, indicating a positive correlation between the two variables.

The data points are categorized by their moisture and ash content, with labels indicating the peat type and its corresponding moisture and ash content. The categories are:

- 1. Hietavaara
- 2. Saattopora
- 3. Vuontisrova
- 4. Palovaara
- 5. Peurakallio
- 6. Tohmovaaara
- 7. Lampeltmossen
- 8. Vuorenmaa

The plot also includes labels for different peat types based on their moisture and ash content:

- Sitomattomat
- Stabiloidut
- 4s2,8
- 4s3,4
- 6s2,8
- 6s3,4
- 6s4,0
- 4s4,0
- 2s
- 8s
- 7s
- 1s4,0
- 1s2,8
- 1s3,4